平成１７年度修士論文

小型風力発電機の設計と動磁場解析

Design and dynamic magnetic field analysis for small-sized wind power generator

高知工科大学 大学院
工学研究科基盤工学専攻

知能機械システム工学コース
環境機械,材料強度研究室

1085224
西村　幸弘

目次

第１章　序論

第２章　発電機の構造

第３章　動磁場解析

第４章　コア形状が発電性能に及ぼす影響

第５章　コアの厚みによる影響と空間磁場の観察

第６章　同径の発電機におけるコイル数、磁極数変化の影響

第７章　コアの材質による影響

第８章　４５０mm 発電機の軽量化の検討

第９章　結言

謝辞

参考文献

第１章　　序論

1-1.　背景

環境問題が声高に叫ばれる昨今、これまで中心的に取り組まれている大気・水質汚染やごみ処理などへの対応に加え、もっと広い視点から捉えようということから、各種の自然エネルギー源まで注目されるようになってきている。この自然エネルギーに関しては、今までもエネルギー枯渇問題への対応として独立した流れの中で議論されてきたが、最近では旧来からの発電プロセスにおけるエネルギー変換過程で生じる排出エネルギーが環境悪化への要因との見方が強まりをみせ、この「エネルギー」と「環境」とが切り離せない状況となってきている。

従来、自然エネルギーに変換する、いわゆる発電を行うための手段としては、火力、水力、原子力などが中心的に位置づけられているが、これらはいずれも何らかの形で自然環境に悪影響を及ぼしている。直接的な影響の少ない水力発電にしても、その発電施設確保において多大な土地面積を必要とし、さらに貯水ダムを設けることに副次的な環境への影響が免れられない。このため、環境面に重視した代替エネルギーが今までにもいくつか提案され、たとえば、太陽光、風力、波力、地熱などが具体的に取り組まれてきている。これらの中で、風力発電は太陽光発電とともにすでに実稼動しているものとして注目度が高くなっている。そして、同様にクリーンエネルギー源として位置づけられているものの、太陽光発電では、そのエネルギー変換プロセスにおいて高効率電池の開発という根幹の問題を抱えている。これに対し、風力発電では既存の確立された各種技術の組み合わせにより実現できるという優位性がある。ただ、この風力発電もエネルギー密度が小さいことや、風の状況・風車の立地条件など地域的な変動要因をもつことなどを抱えている。

国内の風力発電機の設置容量を図 １ に示す。日本における風力発電機の現在の設置容量は建設中、計画段階のものも含め９００メガワットである。設置数は９００基を超える。今後の普及がさらに期待される。一般に風力発電が経済性を保つために必要な風速は、年間平均で秒速５ｍ以上といわれている。この条件を満たす地域は日本全土の７分の１に相当するとされている。このような自然的背景も風力発電の普及の一因を担っていると考えられる。風力発電は風向、風速が変動するため安定したエネルギー供給を行うことは難しいが、太陽光と同様に無尽蔵の純国産エネルギーである。

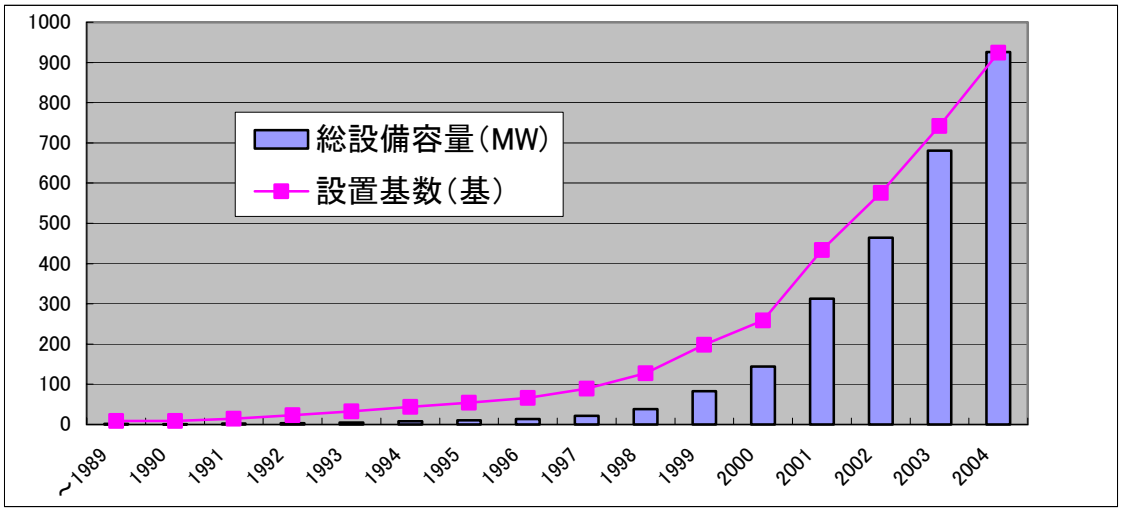

図１　日本における風力発電機の設置容量

注）基数、設置容量は年末の値

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構資料

著作権者：新エネルギー・産業技術総合開発機構

1-2.大型風力発電機と小型風力発電機

図２　大型風力発電機（高知県野市町）

現在、日本において設置、開発が進められている風力発電機の多くは 100kw を超える中、大型のものである。図 2 は高知県野市町にある定格出力 250ｋｗ発電機である。中、大型風力発電機が多く設置されることでいくつかの問題点が見られるようになった。騒音、低周

波音、電波障害、地形及び地質、動物、植物、景観への影響などである。これらの問題点に対しては適宜様々な調査検討が行われている。しかし、中には実際に問題が顕著化した事例もいくつか見られる。

化石燃料に依存しない風力発電機は、地球温暖化をエネルギー施策において規制しようとする際、現時点では最も導入効果が望めるもののうちのひとつである。しかしながら、風力発電機が一方では当該地域の環境に重大な影響を及ぼすものであってはならない。

1-3. 研究概要

日本は他の諸外国と比べて国土が狭いため、大型風力発電機を海外ほど多く設置することは困難とされている。さらに、１－２で述べたように、大型風力発電機にはいくつかの問題点がある。また、政府からも小規模な風力発電施設に関して導入を推進する動きがある。以上のことを背景にして、本研究室では以前から中大型の風力発電機を補完する小型風力発電機の研究と開発を行ってきた。(図 3)

以下にこれまでの本研究で導いた小型発電機の開発の指針を示す。

１）発電機外径を大きくすることで飛躍的に高出力が得られる
２）磁石数、コイル数はスペース内で出来るだけ多くする
３）電圧を整流した際、平均電圧が高く、効率よく電力が取り出せる磁石：コイル数の比は４：３とする
４）コイルは集中巻きと分布巻きがあるが、製作が容易である集中巻きを用いる
５）保持力の大きい希土類磁石を使用する
６）製作が容易なアキシャル型を採用する

図 3　本研究で開発したアキシャルギャップ型コアレス発電機

図 4 は本研究室で高知県企業と共に実際に開発した太陽光・風力ハイブリット発電システム「TWINKLE（トゥインクル)」である。サボニウス型風車を採用し、全方向からの風を受けることが出来る。風車の下に光源として色を自由に出すことができ球切れがなく、効率性の良い『LED 要素』を使用している。TWINKLE は街路灯もしくは避難誘導灯を目

的としており、災害などが起こっても独立して稼動するシステムである。

小型の風力発電機ならば、広い土地を必要とすることなく、大型のものに見られる問題点も少ない。また、モニュメントタイプとして使用でき、大きな企業だけでなく小さな町工場でも製作することができる。さらに、設置主の資金的制約もそれほど大きくない。そのため本研究では、低風速からでも回転する小型の発電機に着目し、この研究、開発を行っている。

図 4　太陽光・風力ハイブリッド発電機

1-4.　研究目的

本研究の目的は、低風速からでも回転する小型の風力発電機において、最適な内部構造の設計指針を導くことである。そのためにこれまでいくつかの解析と実験を行った。動磁場解析と実際に開発した発電機の回転実験である。そして、これらの解析と実験結果を比較検討することで新たな開発の指針を導く。

第２章　発電機の構造

2-1.　発電原理

磁場の中で導体を移動させることで、導体の両端に誘導起電力 e が発生する。

$$e = vBl \qquad (1)$$

v：速度［m/s］

B：磁束密度[T]

l：磁界中の電線の長さ[m]

(1)式における誘導起電力の考え方を、コイルとの関係に置き換えると、

$$e = -N\frac{\Delta\phi}{t} \qquad (2)$$

N：コイル巻き数

ϕ：磁束［Wb］

t：　時間［s］

これはつまり、時間当たりの磁束の変化にコイルの巻き数をかけたものである。

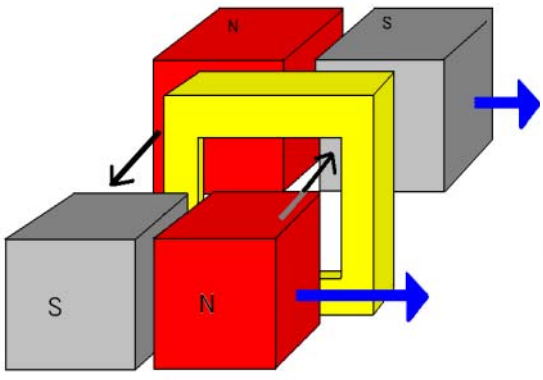

図５　誘導起電力発生原理のモデル

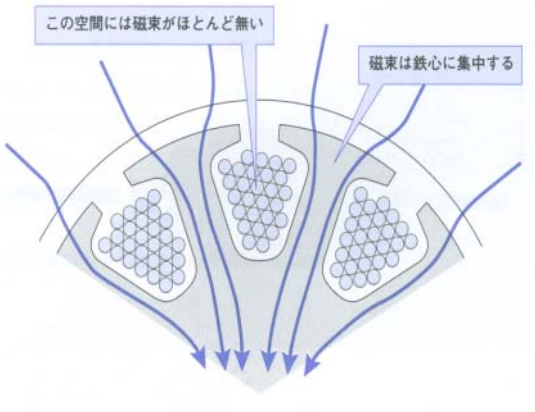

図６　鉄心に集中する磁束

図 5 は誘導起電力発生原理のモデルである。黒の矢印が磁束、青の矢印の方向に磁極を動かす。このように磁束がコイルを横切ることでコイル内に起電力が発生する。

図 6 は一般的な発電機の内部の断面図である。灰色の部分が鉄心で、青の部分がコイル

である（この２つがローターである）。磁石はステータで、これらの外周に配置されている。青矢印が磁束である。磁束は図のように鉄心に誘導されてコイルを横切る。これは、鉄の透磁率の高さを利用したものである。（例えば、空気の透磁率が１であるのに対し、鉄の透磁率は 1000 である。）この鉄心に磁束を誘導している状態でローターを回転させることで効率よく発電する。

2-1.　アキシャルギャップ型コアレス発電機の構造及び特徴

本研究で磁場解析を行う発電機はアキシャルギャップ型コアレス発電機である。

アキシャルギャップ型とは回転軸（シャフト）に対して固定子（ステータ）と回転子（ロータ）が平行に設置されている発電機の構造である。逆に、回転軸に対して固定子と回転子が垂直に設置されている発電機の構造をラジアルギャップ型と呼ぶ（図 7）。

一般的な発電機の内部には、コイルの中心に鉄心が組み込まれている。これは磁石から出た磁束をうまく導くためである。しかし、同時に発電機の回転に必要なトルク数も増えてしまう。この鉄心を取り去りさったものをコアレスという。

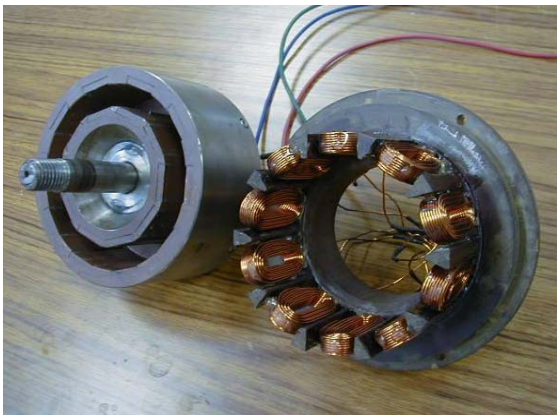

図 7　ラジアルギャップ方発電機

2-3.　ヒステリシスカーブ（BH 曲線）について

図 8 において、磁化されていない鉄片を磁界中に置き、磁界の大きさを 0→＋Hm へ変化させると鉄片内部の磁束密度 0→a へ変化する。次に磁界の大きさを＋Hm→0 へ戻していくと、磁束密度は a→0 へは戻らず、a→b へ変化する。つまり、磁界がなくなっても磁束密度 Br が残ってしまう。これを残留磁気といい、これを打ち消すためには Hc の磁界の大きさが必要になる。この磁界の強さを保磁力という。さらに磁界の大きさを 0→－Hm→0→＋Hm と変化させると磁束密度は b→c→d→e→f→a と変化する。このように、磁性体の磁化の状態は、磁界の大きさだけでは決まらず、それまでの磁化の経過に関係し、この状態を表す曲線をヒステリシスループという。

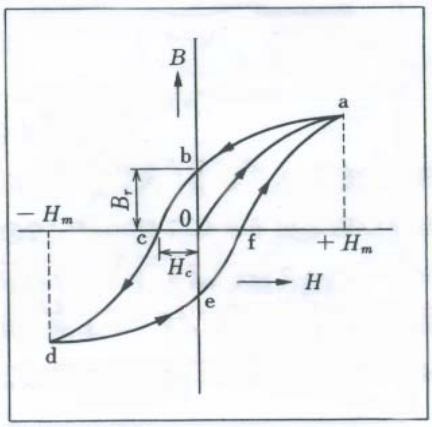

図 8　ヒステリシスループ

磁石や、電磁石などの材料として適するのはこの残留磁気が大きいものである。残留磁気 Br と保磁力 Hc を表す曲線、つまりこのヒステリシスループの第２象限をヒステリシスカーブと呼ぶ。この BH 曲線によって磁石の強さの特性を見ることが出来る。

2-4.　発電機内部で発生するコギングトルクのメカニズム

一般的な発電機のシャフトを指で回すと、ロータの歯と磁石の作用によってゴツゴツとして反抗力を感じることがある。これをコギングトルクという。

この原因と考えられるのが発電機内部、磁気回路に発生する渦電流である。ステータ鉄心（コア）に鋳物や軟鋼を使った発電機の場合、発電の際に鉄心内部に電磁誘導による電流（渦電流）が発生する。この渦電流は科学の分野で言うところの「現状を維持しようとする法則」に当てはまり、通過する磁束を打ち消すような方向に、磁場を作り出す電流である。

渦電流の発生を小さく抑えるため、絶縁した薄いケイ素鋼板を積み重ねた、積層コアとなっているものもある（図 9）。これは、渦が発生する面を小さくすることで渦を小さくなるのを狙ったものである。

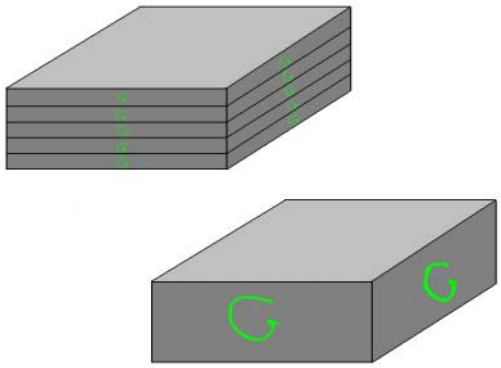

図 9　積層コアと普通のコア

第 3 章. 動磁場解析

3-1. 磁場解析の目的

発電機の性能を調査するためには、発電機を製作して実験を行うことが望ましい。しかし、各仕様の発電機を製作して実験を行うと多額の費用がかかる。また、磁束の流れ、磁束密度などは視覚的に表すことが難しい。そこで、本研究室では動磁場解析を利用して、シミュレーションを行いその結果を参考にしながら発電機の開発を行うことにした。

3-2. 解析用ソフトと動作環境

動磁場解析には次の 3 つのソフトを用いた。

・ELF/MAGIC
・ FEMAP
・Pro Engineer

FEMAP が解析用のモデリングソフトであるが､このソフトでは 1 からモデルを作成するのに非常に手間がかかる。このため、一旦 3D－CAD ソフトの Pro Engineer でモデルを作成し、それを中間形式の iges ファイルに変換し FEMAP に落とし込み、解析用モデルを作成している。解析用モデルの動磁場解析には ELF/MAGIC を用いる。

動磁場解析に利用したソフトは株式会社エルフの ELF/MAGIC である。本ソフトは「積分要素法(IEM)」を用いた 3 次元非線形磁場解析プログラムである。有限要素法(FEM)などに必要な空間メッシュ・境界条件・ゲージ条件など必要としないため、データ作成が簡単であり、短時間で計算を行うことができる。本研究で使用する解析モデルでは、解析時間は約 5 時間程度である。

プリポストプロセッサには FEMAP Ver8.2 を使用した。解析で使用した動作環境は下記のとおりである。

- CPU： Intel Pentium 4　2.8GHz
- メモリ： 1GB
- OS： Windows 2000

3-3.　計算式

ELF シリーズで使われている主な積分要素法の計算式は以下の通りである。積分要素法ではポテンシャルを積分で計算して変数の一次結線で表し、方程式を立てる。

ELF/MAGIC においてトルクに関する式ではマクスウェル応力式と真空中のマクスウェル応力式が基本となっている。

マクスウェル応力式は下記である。

$$\vec{P} = \mu_0 H_n \vec{H} - \frac{\mu_0 H^2}{2} \vec{n}$$

真空中のマクスウェル応力式は以下である。

$$\vec{P} = (\vec{B} \cdot \vec{n})\vec{H} - \frac{1}{2}(\vec{H} \cdot \vec{B})\vec{n}$$

H_n ：磁場 H の法線成分

n　：法線方向の単位ベクトル

H　：磁界強度

μ　：比透磁率

B　：磁束密度

トルクを求めるのに ELF/MAGIC では、

$$\vec{F} = \sum S\vec{P}$$

$$\vec{T} = \sum \vec{r} \times S\vec{P}$$

Σ：ベクトルの和

S：マクスウェル応力面要素の面積

r　：要素中心点の位置ベクトル

誘導電流の計算方法としては電気回路についての関係式、誘導電力についての関係式を変形した下記の式が ELF/MAGIC では使用されている。

$$I_{ind} = -\frac{N}{R} \cdot \frac{\sum_{\mathrm{k}} \Delta\Phi_{\mathrm{k}}}{\Delta t}$$

$$I = I_0 + I_{ind}$$

$$E = -R \cdot I_{ind}$$

3-4.　解析条件

本研究において、解析では磁極 Nd-Fe-B 希土類永久磁石、バックヨーク鉄 ss400 を使用している。それぞれの磁化特性表を以下に示す。（図 10、図 11）

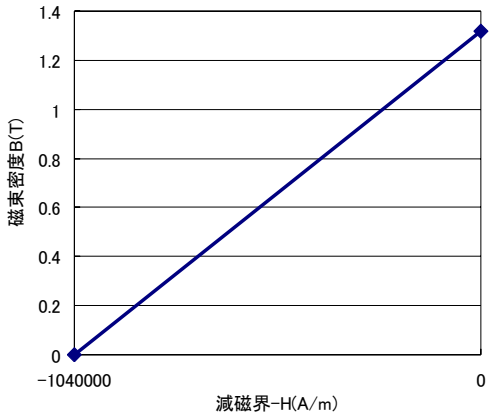

図 10　Nd-Fe-B 希土類永久磁石の磁化曲線

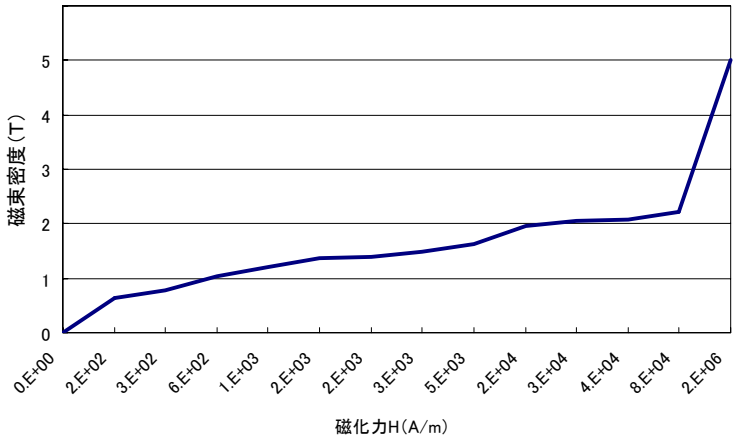

図 11　ss400 の磁化曲線

3-5.　解析モデル

以下に発電機の解析モデルを示す。（図 12）5 章で解析を行った 450mm 発電機である。解析時間短縮のため、対象性を持たせ、形状の簡略化をおこなっている。軸方向に 2 分の 1、半径方向に 12 分の 1 の計 24 分の 1 の分割モデルでの解析を行った。発電機の構造と縮尺の様子を理解するために 24 分の 1 の解析用モデルとともに、2 分の 1 モデルと 1 分の 1 モデルも同時に示す。これはアキシャルギャップ型発電機である。ロータは外側の磁石とバックヨークで、ステータは内側のコイルである。

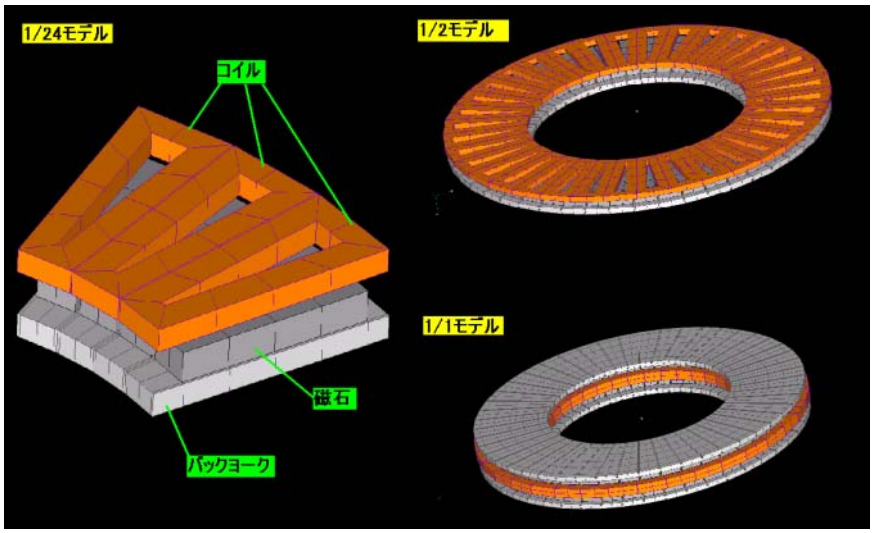

図 12　各分割数の解析モデル

第 4 章　コア形状が発電性能に及ぼす影響

4-1.　現状の発電機の問題点

低回転における発電能力のさらなる向上を目指し、発電機の性能評価および設計因子変更にともなう発電能力の検討をおこなった。特に注目したのがコアの形状である。これまで開発を行ってきたコアレス発電機は、コイル内部が空気となるため、コギングトルクが生まれず、低風速からの回転を可能としている。しかしながら、コアレスにより回転しやすい反面で隣の磁石に流れる磁束が多く、コイルを通過する磁束密度が減り発電量が小さくなる。図 13 の空間磁場解析結果においてコンター図が表すのは空間磁束密度である。隣の磁極に多く磁束が流れている様子が分かる。

そこで、コイルを通過する磁束を増やすためコイルにコアを配置することを考えた。コアを配置することでコギングトルクが生まれるが、コアの形状次第ではコギングトルクを少なくする事ができ、発電能力の向上が行えるのではないかと考えた。

コギングトルクとは、回転子の磁石と固定子の吸引力で発生するトルクの回転ムラのことである。コギングトルクが大きいと回転抵抗が大きいことはもちろん、発電効率の低下、振動による機器への影響、騒音の発生の原因にもなる。

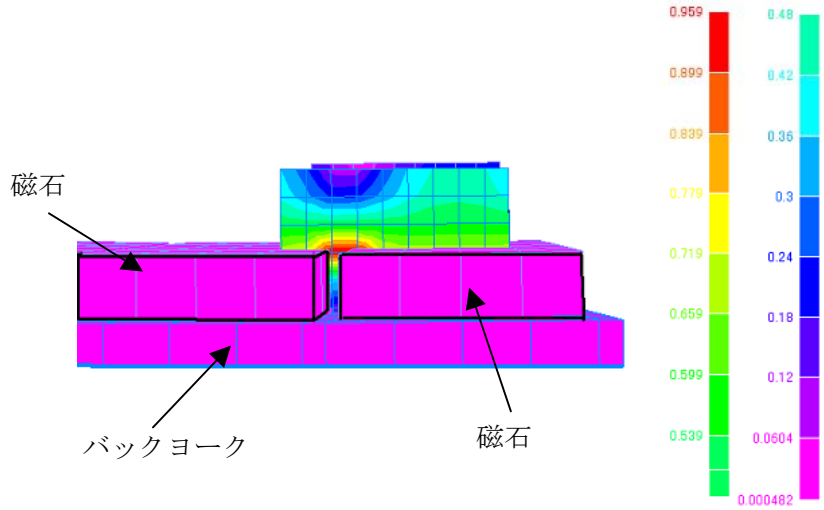

図 13　空間磁場解析の結果

4-2.　発電機の評価実験

モータを使って発電機の性能評価を行った。実験方法については以下に示す。図 14 は実験装置であり、図 15 は実験の回路図である。

・回転数は DC モータの速度調整で一定に保つ
・DC モータから発電機の軸トルクを測定し、軸トルクと回転数から発電機への入力電力

(Wi)を計算で求める

・発電機の出力は三相ダイオードブリッジを通じて負荷に供給される。出力電圧、電流、電力(Wo)は三相ダイオードの出力側をディジタルパワーメーターで測定する。負荷は可変抵抗により加減する。なお、回路図の R'は、無負荷時のダイオード出力電圧測定用の高抵抗で負荷としては無視できる。

・発電効率 η は η =Wo/Wi で求める

・効率 η はダイオードブリッジの効率を含む

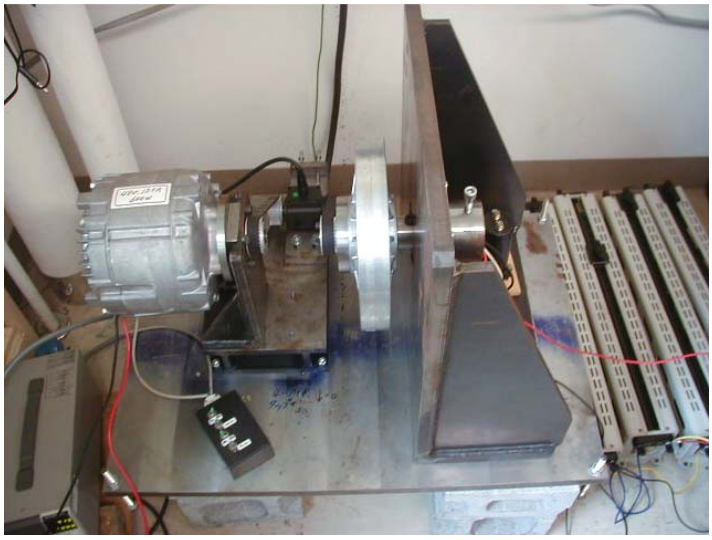

図 14　実験装置

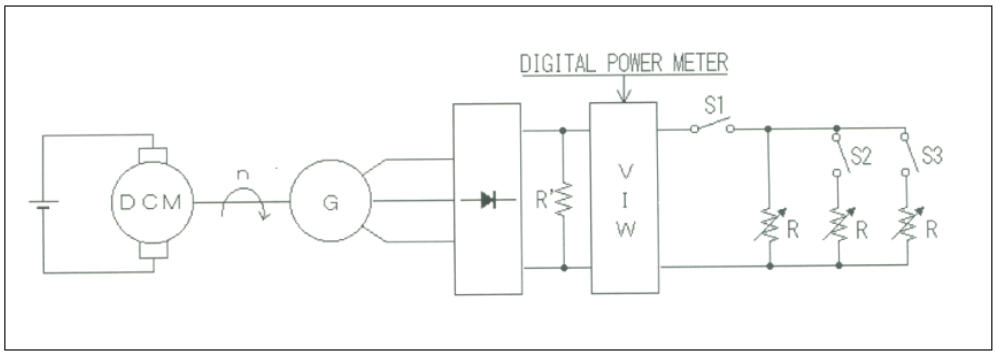

図 15　実験回路図

今回、実験を行った発電機の仕様は表 1 のとおりである。モデル１はコイルの巻き数を増やし対向する磁石間距離を長くした。モデル２はコイルの巻き数を減らし対向する磁石間距離を短くした。出力電力、トルク、発電効率に注目した。

表１　実験に使用した発電機の仕様

	発電機直径	コイル直径	巻数	コイル厚み	磁石間距離

モデル1	200	1.0	77	9.6	12.2
モデル2	200	1.0	108	14.6	17.2

4-3.　実験結果

出力電力値の比較(図 16、図 17)により、モデル 1 がモデル 2 よりも出力電力が高いことが分かる。コイルの巻数を増やすよりも、磁石間距離を縮めてコイルを鎖交する磁束密度を増やした方が発電能力を向上できることが分かった。

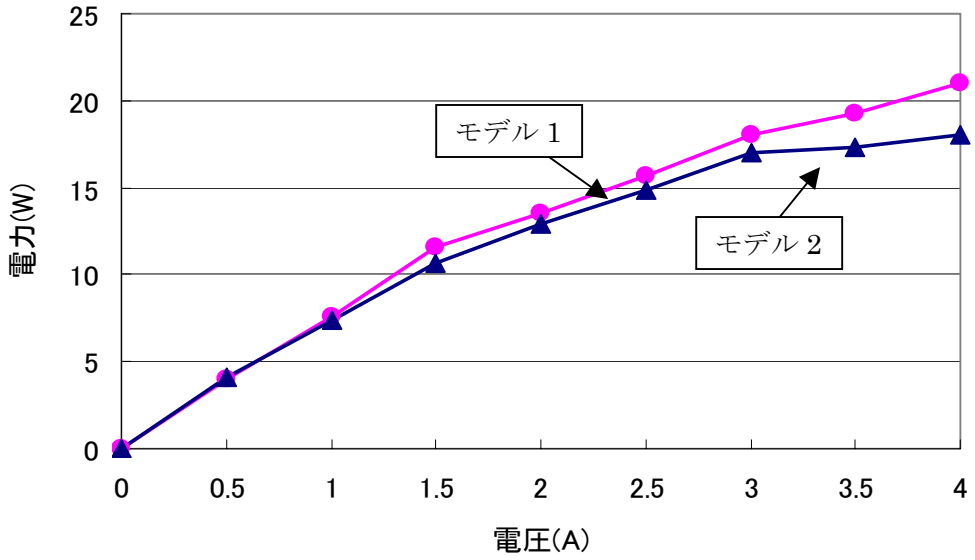

図 16　出力電力の比較(150rpm)

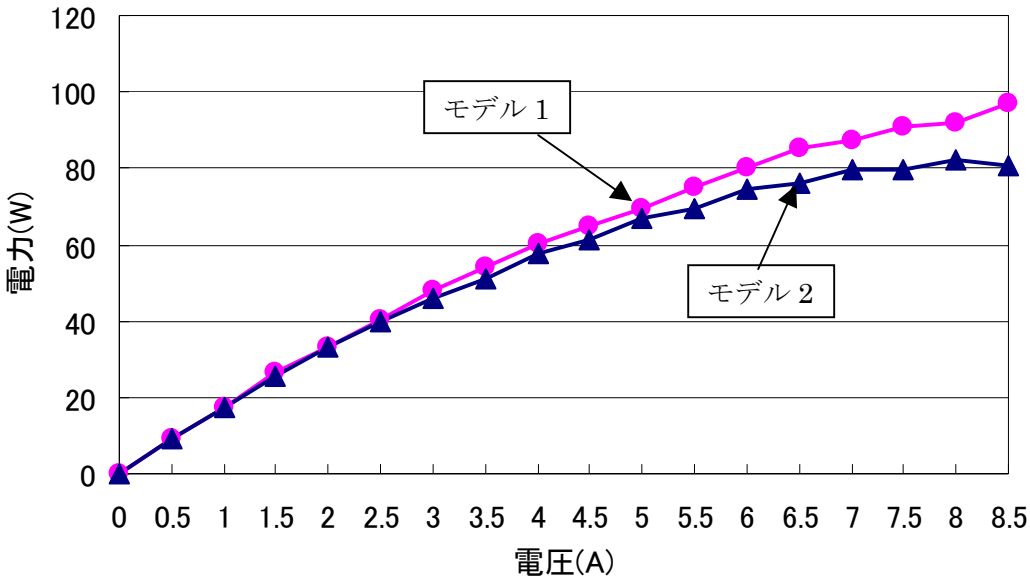

図 17　出力電力の比較(300rpm)

図 18、図 19 のトルク比較の結果から、モデル 1 がモデル 2 よりも回転に必要なトルクが小さいことが分かる。巻数を増やした事によって、銅損が増加したことが影響していると考えられる。そのため、発電効率を比べてもモデル 1 の方が、効率が良いことが分かる。(図 20、図 21)

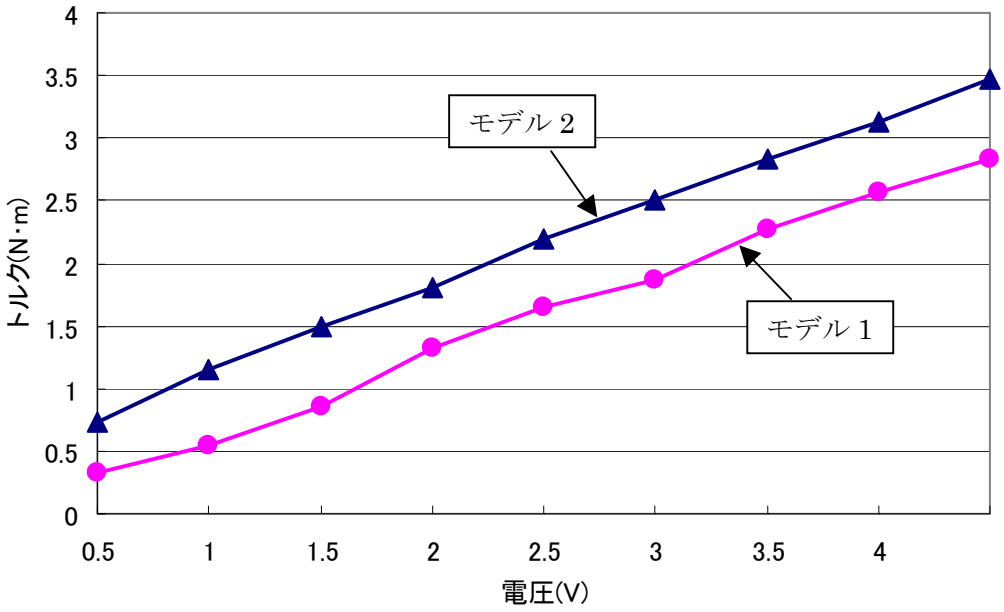

図 18　トルクの比較(150rom)

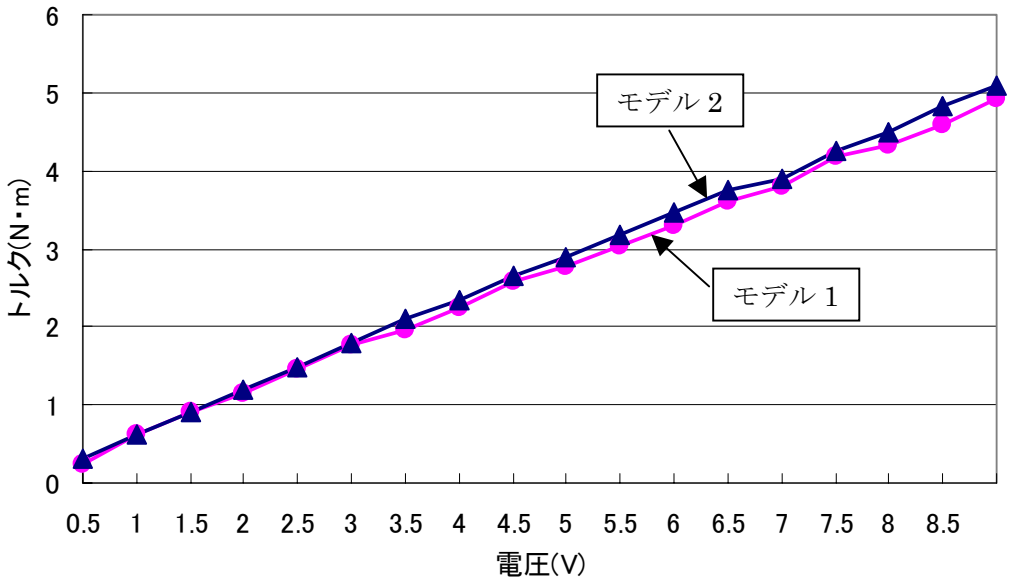

図 19　トルクの比較(300rom)

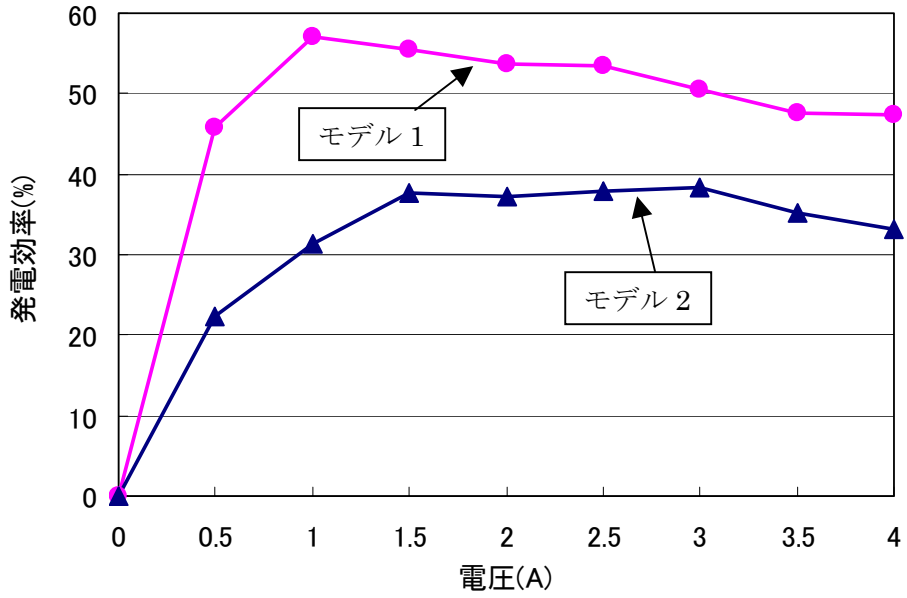

図 20　発電効率の比較(150rpm)

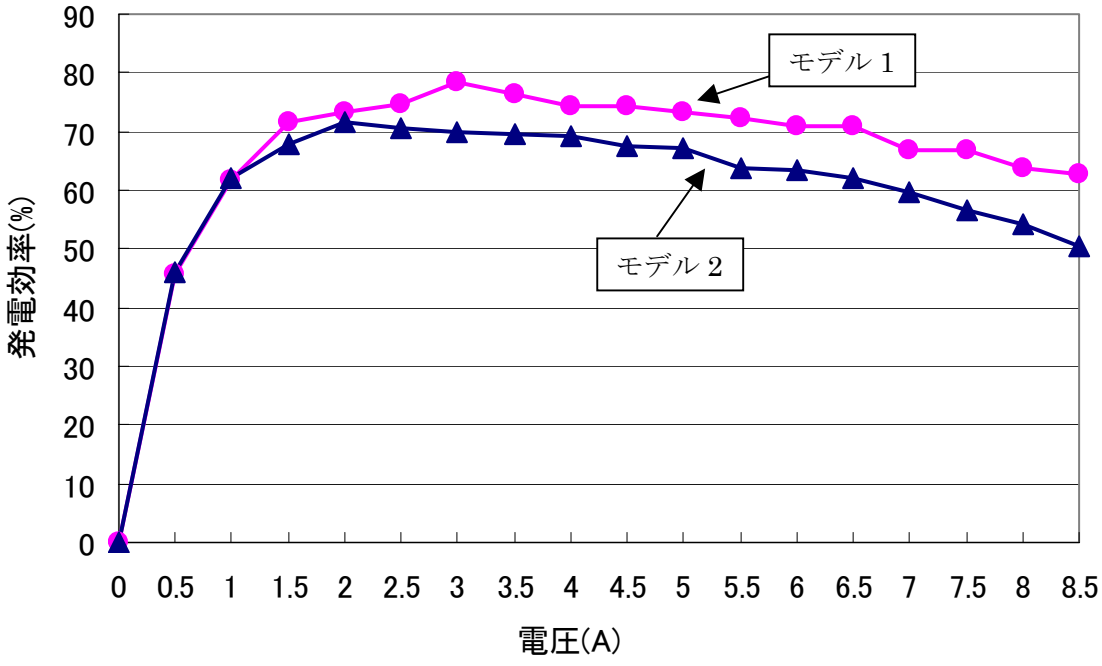

図 21　発電効率の比較(300rpm)

4-4.　実験結果と数値解析値との比較

動磁場解析は、開発の効率化向上のために欠かせないツールである。しかし、実験結果とどれほど近似しているかを調べる必要がある。実験結果と近似しているということが証明できたならば、実験を行わなくてもシミュレーション上で定性的な値を求めることができる。その結果を利用して、開発期間の短縮・コストの削減が可能になる。

そこで、無負荷状態時における実験結果と数値解析結果との値の比較を行った。比較した発電機は前述で述べたモデル 1 で行った。図 22 は解析モデルである。

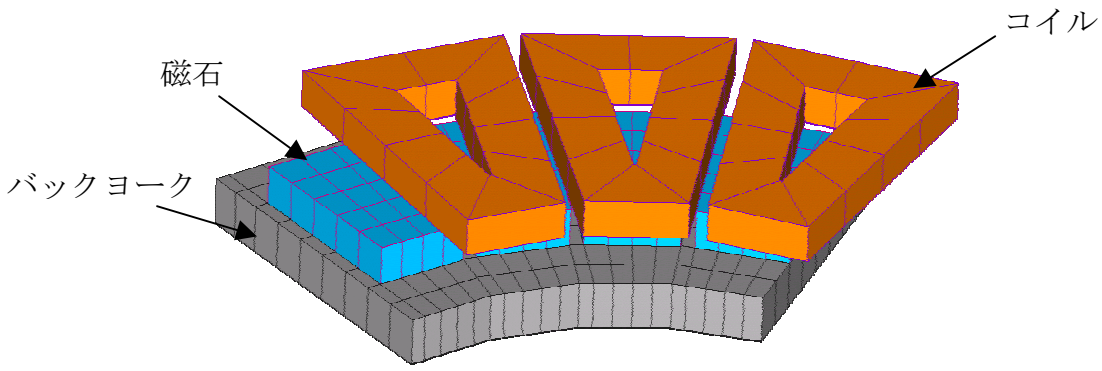

図 22　解析モデル

4-5.　比較結果

解析結果では各回転数における 3 相交流電圧が求まる。そのデータを実験値と比較するためには、実効値に変換する必要がある。式 1 より実効値への変換を行った。

$$実効値(V) = \frac{最大電圧値(V)}{\sqrt{2}} \qquad \cdots\cdots (1)$$

表 2 と図 23 は実験値と解析値(実効値)の比較である。グラフからも分かるように、実験値と近似した結果を得る事ができた。これにより、本ソフトを利用して発電機の性能向上に関する検討を行えることが確認できた。

表 2　各回転数における実効値

回転数(rpm)	100	200	300	400	500
実験値(V)	4.85	9.8	14.67	19.53	24.52
解析値(V)	4.852	9.705	14.557	19.410	24.262

回転数(rpm)	600	700	800	900	1000
実験値(V)	29.3	34.25	39.01	44.15	48.85
解析値(V)	29.115	33.967	38.820	43.672	48.524

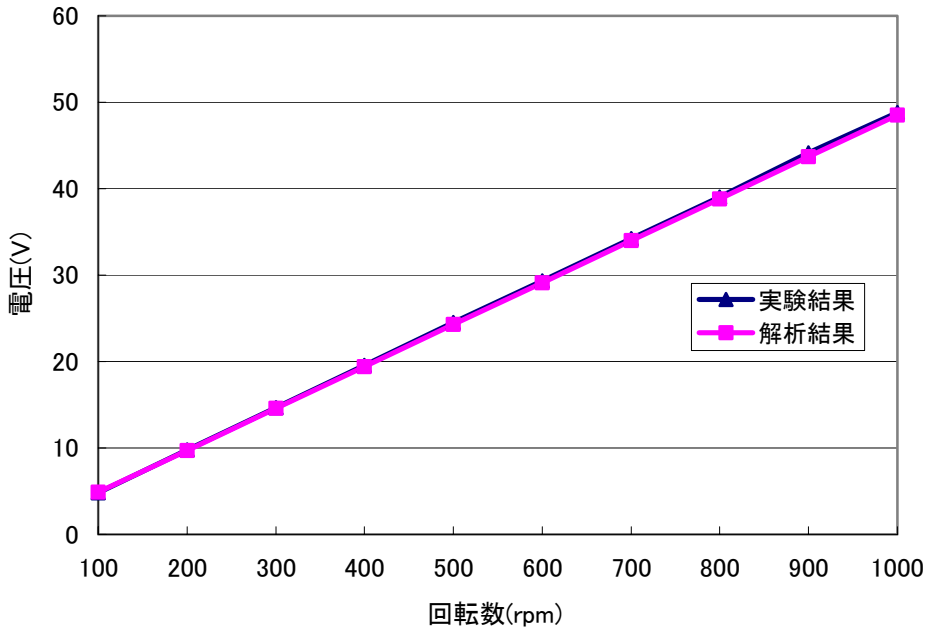

図 23　実験結果と解析結果の比較

4-6.　コア形状による発電能力の影響調査

動磁場解析により、コア形状の違いによる発電能力の影響を調べた。無負荷時で 200 回転したときの出力電圧、コギングトルクの変化を調べた。無負荷時での性能を調べる事で、その発電機の特性が検討できる。コアには電磁鋼板(50H700)を使用した。図 24 に磁化曲線を表す。

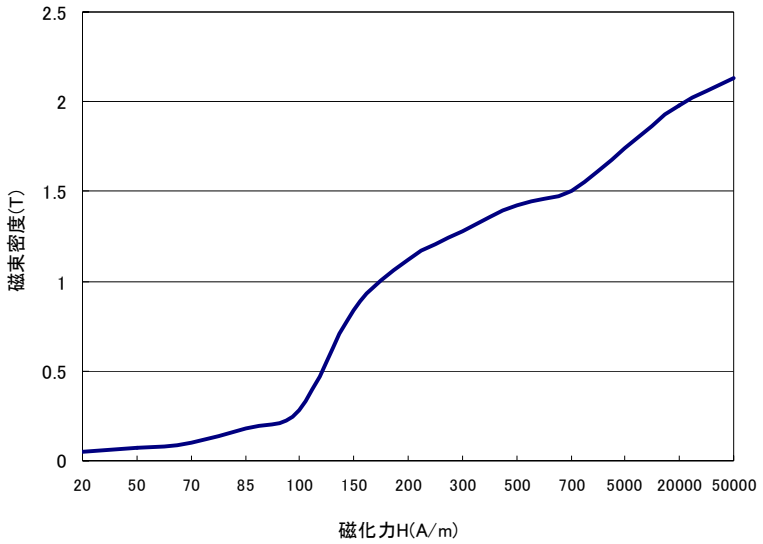

図 24　磁化特性(50H700)

［発電機仕様］

調査に使用した発電機の仕様を表 3 に表す。

表 3　発電機の仕様

発電機直径	線径	巻数	磁石厚み	ヨーク厚み	コイル厚み	コア材質
200	1.0	77	5	2	9.6	50H700

[共通モデル条件]　・軸方向に 1/2 モデル

・半径方向に 1/6 モデル

[コア形状]

コアレス：コアを配置していないもの（図 25）

コア形状 A：　コイル内側に沿わせてコアを配置　（図 26）

コア形状 B：　コイル内側の左右にコアを配置（図 27）

コア形状 C：　コイル内側に 1 枚、外側にも 1 枚沿わせて配置（図 28）

コア形状 D：　コイル内側一面にプレート状のコアを配置（図 29）

コア形状 E：　コイル内側一面にパンチ穴プレート状のコアを配置（図 30）

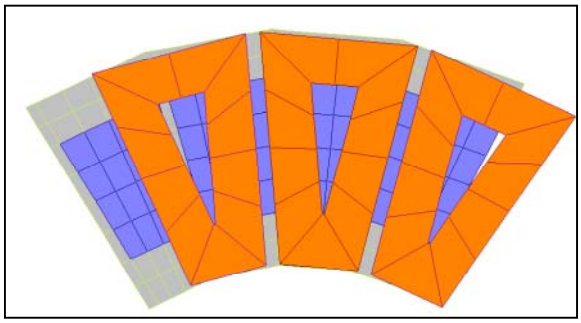

図 25　コアレス

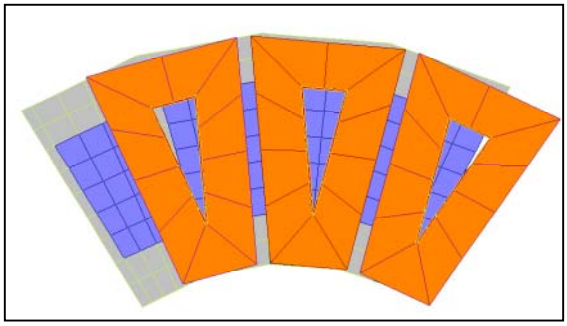

図 26　コア形状 A

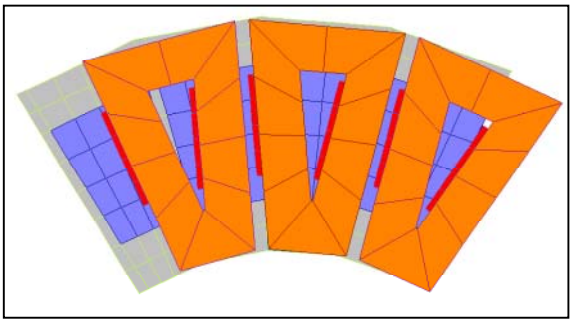

図 27　コア形状 B

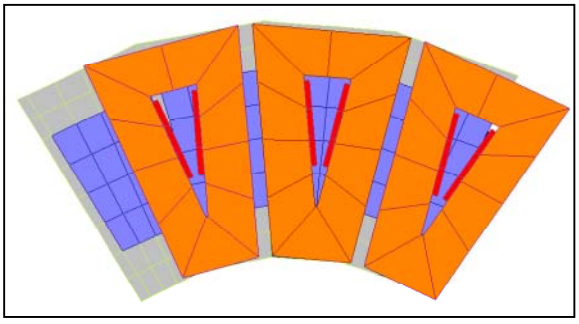

図 28　コア形状 C

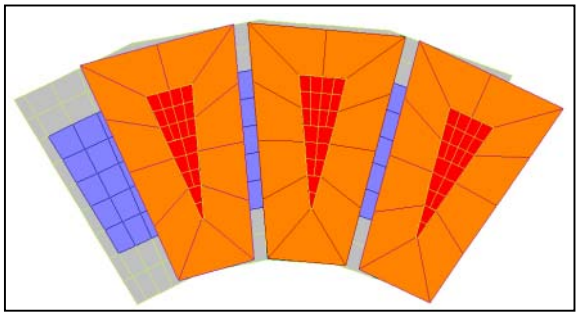

図 29　コア形状 D

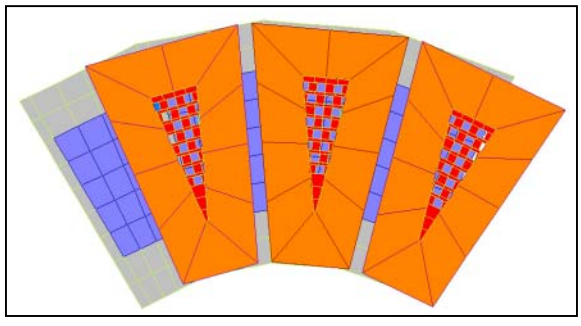

図 30　コア形状 E

4-7.　解析結果m

各モデルにおける最大電圧の結果を表4と図31に示す。コイル内にコアを配置する事で無負荷時での出力電圧はコアレスよりも 増加する事が分かった。その中でもモデルEの値が最も大きくなっている事が分かる。コアレスと比べると約13.5%の向上である。

表 4　コア形状による最大出力電圧

コアレス	形状A	形状B	形状C	形状D	形状E
12.135	13.320	12.733	13.148	13.314	13.778

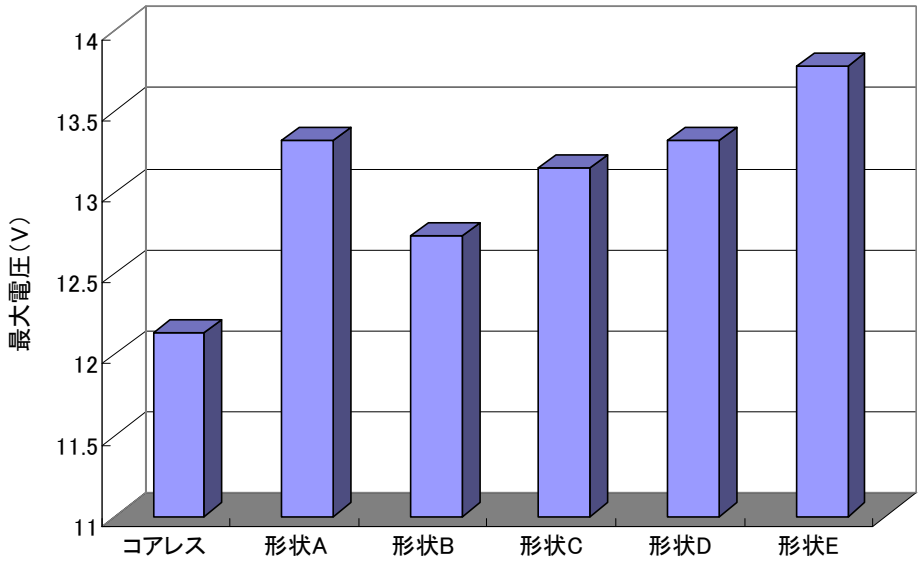

図 31　最大出力電圧の比較

各モデルにおけるコギングトルクの最大値を表 5 と図 32 に示す。図 33 は 20 度回転させたときの各角度についてのコギングトルクのグラフである。当然ながら、コアを配置した事で、コアレスに比べてコギングトルクが増加している。しかし、その形状によって値も大きく変わってくる。コア形状 B、C、D については N と S の切り替わりが大きい。しかし、コア形状 E、F についてはその切り替わりのムラが少ない。さらに、モデル E には穴を空けているため、モデル D に比べて渦電流の発生を抑えられていると考えられる。

表 5　各コア形状よる最大コギングトルク

コアレス	形状A	形状B	形状C	形状D	形状E
0.0448	0.0578	0.0694	0.0703	0.0476	0.0475

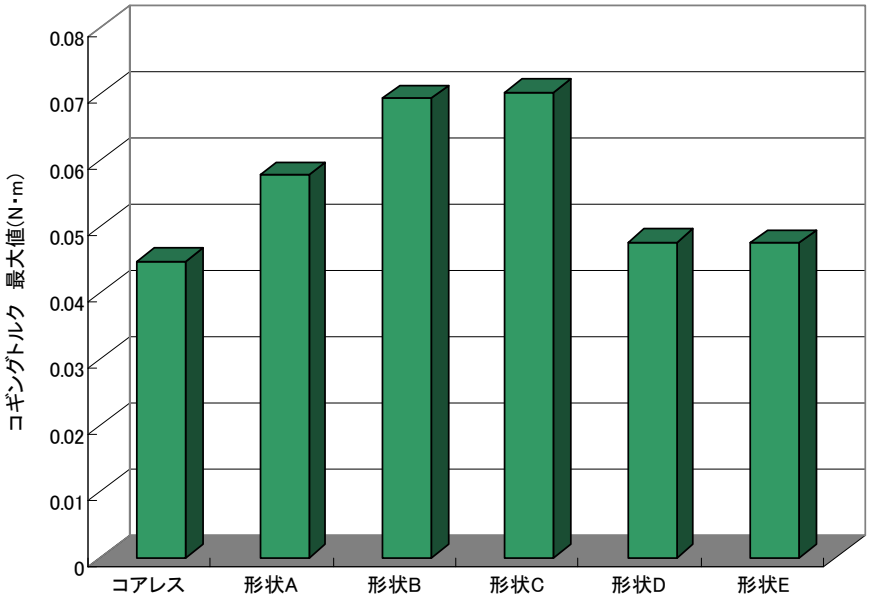

図 32　コギングトルクの比較

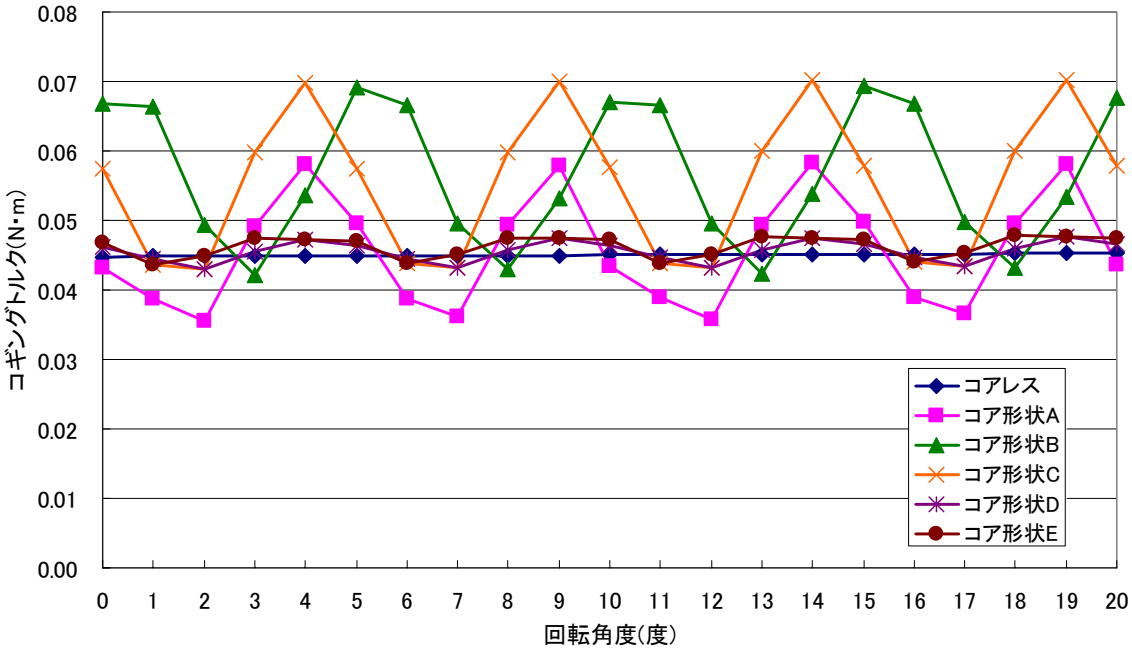

図 33　各回転角度におけるコギングトルク

今回の解析結果から、出力電圧とコギングトルクの結果を考慮すると、コアの形状として形状 E が適当であると考えられる。今後は、どのような穴形状にするかを検討しなければならない。

4-8 バックヨークの厚さによる発電能力への影響

バックヨークは磁気回路を形成するために用いられる。その厚みを増やせば磁束通過断面積が増え、バックヨークの飽和による磁気漏洩は減少する。しかし、その厚みを増やす事により、発電機自体の重量が増加し、回転を妨げることになる。

そこで、バックヨークが及ぼす発電能力への影響を磁場解析により調べ、発電機の最適設計を行うことにした。評価方法は図 34 のバックヨークの厚さ d を 0mm から 6mm まで変化させ、無負荷時での電圧を求めた。表 6 は評価に用いた発電機の仕様である。

表 6　発電機の仕様

発電機直径	線径	巻数	磁石厚み	ヨーク材質
200	1.0	77	5	SS400

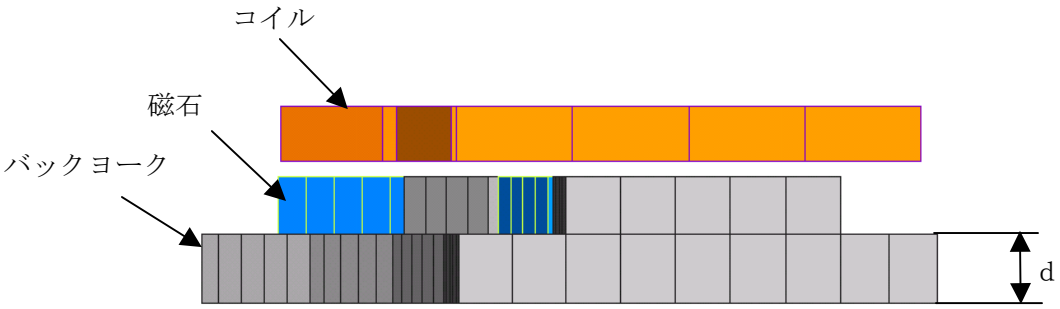

図 34　ヨーク厚み d

磁場解析による結果から、バックヨークを用いることで発電性能に影響を及ぼすことが分かった。バックヨークの無い状態と比較すると、厚さを 2mm にすることで電圧値が約 40%向上している。それ以降も少しずつ増加はしているが、大きな増加ではない。発電性能、重量を考慮し、この発電機における、バックヨークの最適な厚みは 2mm であると検討できる。

4-9　解析結果

表 7 と図 35 に各ヨーク厚さによる最大電圧値の比較を示す。

表 7　各ヨーク厚さによる最大出力電圧

ヨークの厚み(mm)	電圧最大値(V)	重量(Kg)
0	8.70	0
1	10.92	0.28
2	12.13	0.54
3	12.32	0.84
4	12.337	1.1
5	12.341	1.38
6	12.344	1.66

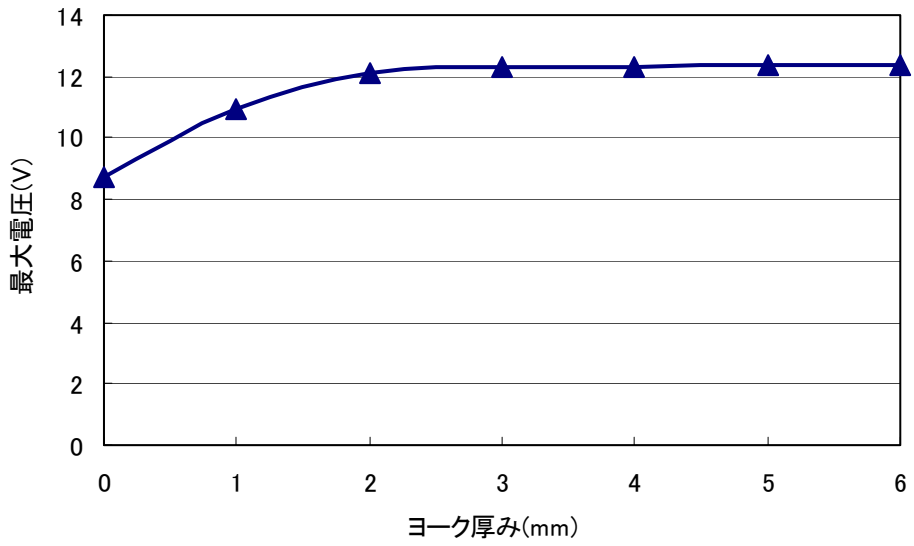

図 35　各ヨーク厚さによる最大出力電圧の比較

4-10　考察

動磁場解析からコアの形状により出力電圧、コギングトルクの値が大きく変わってくることが分かった。また、磁気回路を形成するバックヨークの厚さについて、ある厚さ以上からは発電能力に及ぼす影響が変わらなくなる。重量バランスを考えながら最適設計を行う必要がある。

第５章.　　コアの厚みによる影響と空間磁場の観察

5-2. 概要

第 4 章ではコア形状が発電性能に及ぼす影響を調べた。次にコアの厚みによって発電機の磁気回路や発電機内の空間磁場がどのように変化するかを調査した。コアの形状はコイル内一面にプレート状に配置したものを採用している。これは 4 章の結果を参考に、また製作が容易であると考えたためである。図３６中のコアの厚みｄを変化させた際の無負荷電圧と回転に必要なトルクの計算、そしてコイル内部の磁束密度の観察をおこなった。

発電効率の向上にはコイル内を磁束が多く通過する必要がある。そのためコイル内部の磁束密度の評価を行った。磁場評価要素は図 37 のようにコイルの厚み方向の断面と半径方向の断面に配置した。この検討に使用した発電機の仕様を表８に示す。

表８　発電機の仕様

発電機直径	線径	巻数	コイル厚み	磁石厚み	ヨーク厚み
200	1.0	77	10	5	3

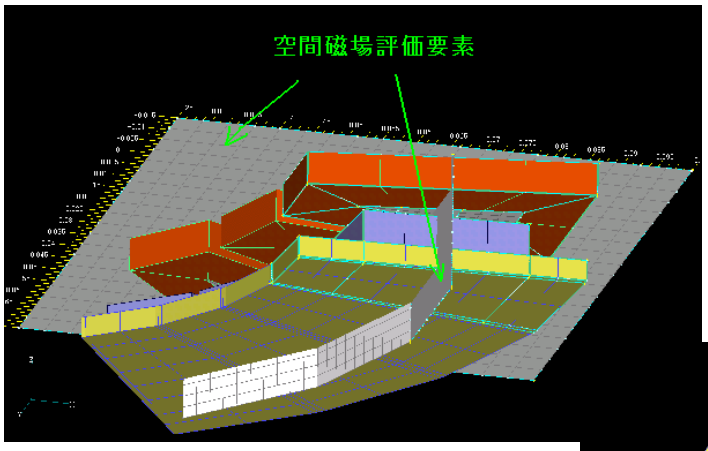

図 36　空間磁場評価要素の配置

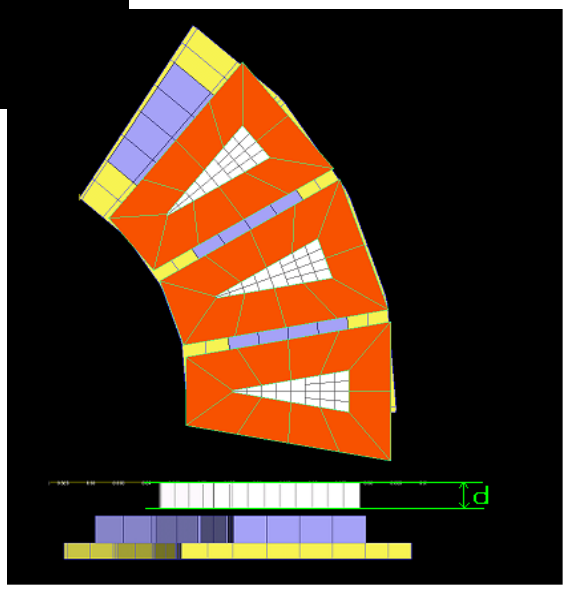

図 37　コア厚みｄ

5-3. 解析結果

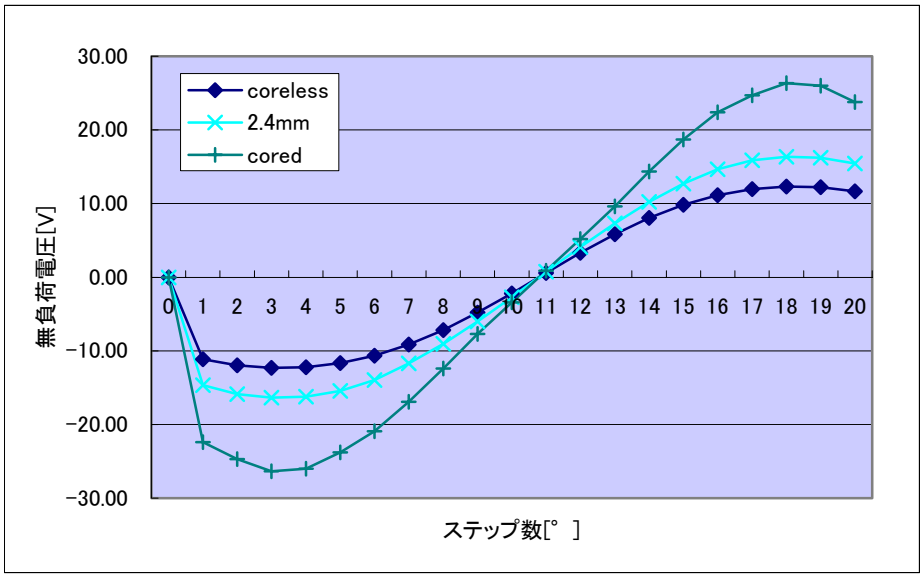

図 38　U 相の無負荷電圧

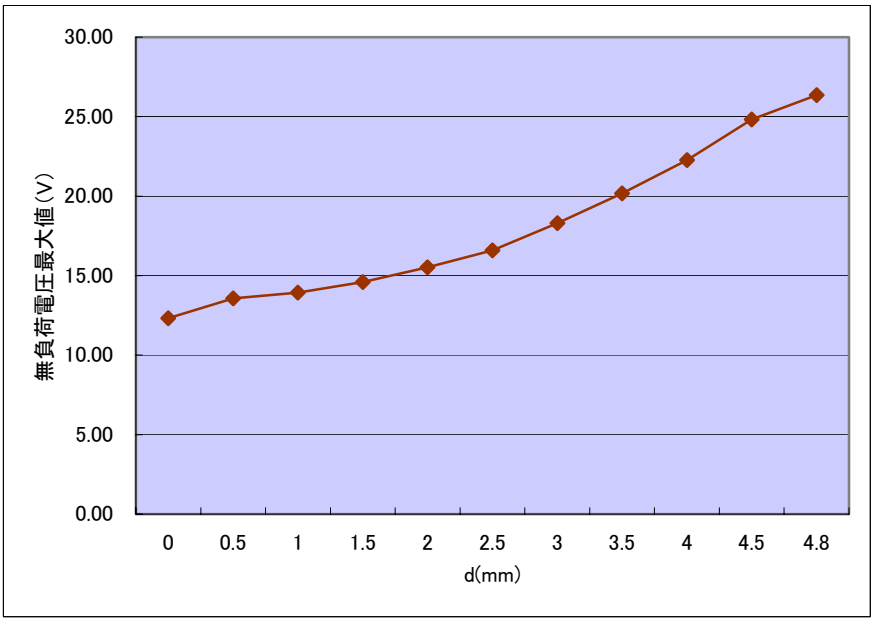

図 39　無負荷電圧最大値の比較図

図 38 に回転角度ごとの無負荷電圧の変化を示す。電圧は U,V,W 相にそれぞれ出力されるが、U 相のみで比較する。X 軸が回転角度、Y 軸がトルクの最大値である。コアの厚み 0mm（coreless)、コイルの厚み分の 4.8mm（cored)、その中間の厚さ 2.4mm の 3 つについて比較している。

図 39 にコアの厚み d ごとの無負荷電圧の最大値の変化を示す。X 軸がコアの厚み d、Y

軸が無負荷電圧の最大値である。ほぼ一定の傾きで直線的に増加している。コアをコイルの厚み分（4.8mm=cored）配置した場合、コアレス（0mm）と比較して 2.1 倍になる。

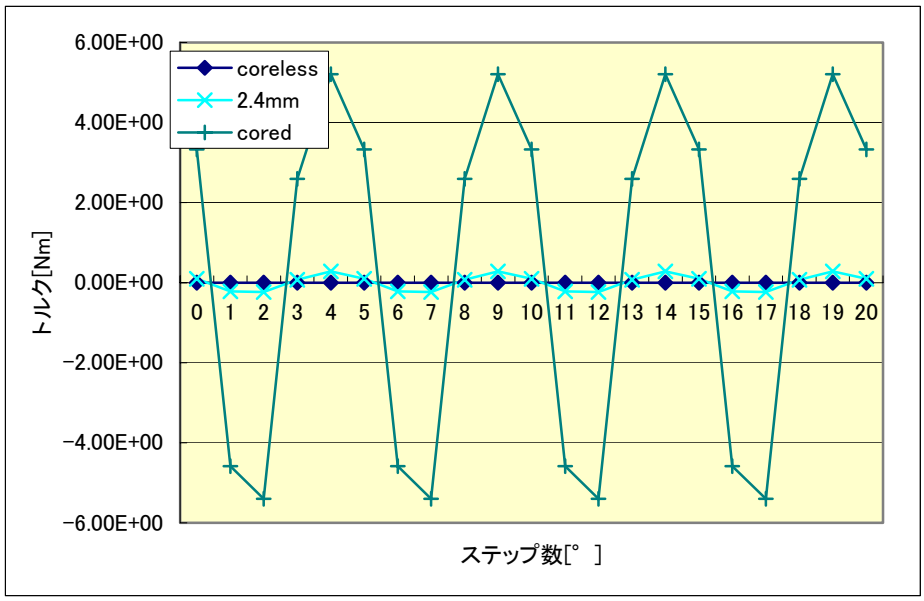

図 40　回転に必要なトルク

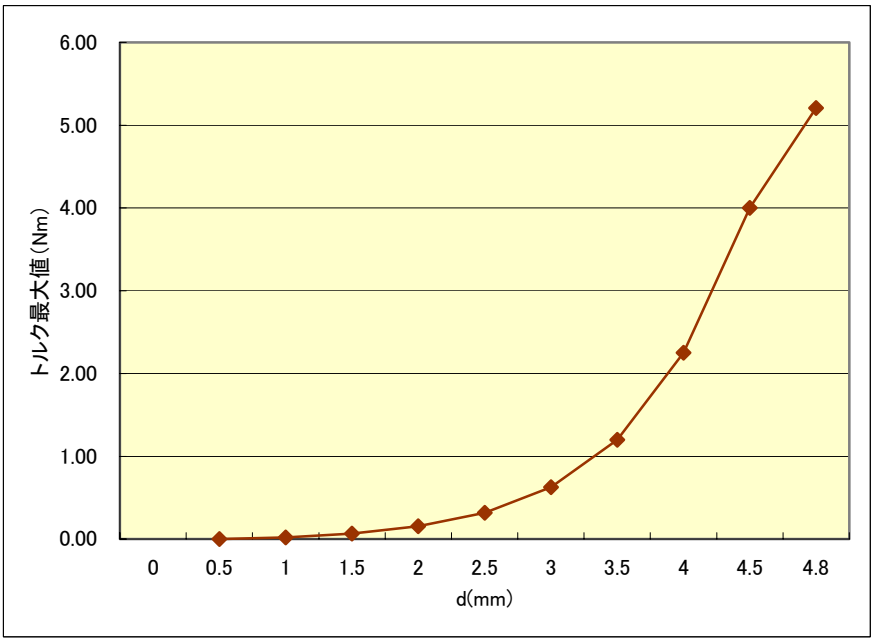

図 41　トルク最大値の比較

図 40 に回転角度ごとの回転を妨げるトルクの変化を示す。X 軸が回転角度、Y 軸がトルクの最大値である。コア有りではコギングトルクが発生している様子が分かる。

図 41 にコアの厚み d ごとのトルクの最大値を示す。X 軸がコアの厚み d 、Y 軸がトルク

の最大値である。トルクの値はコアが厚くなるにしたがって 2 次曲線的に増加している。

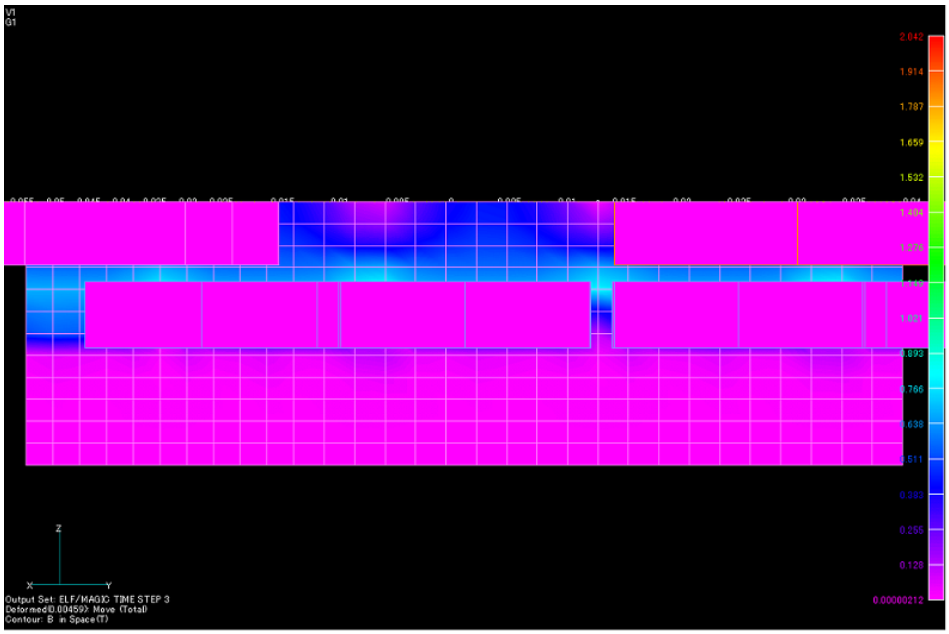

図 42　コアレス発電　機空間磁場　X-Z 方向

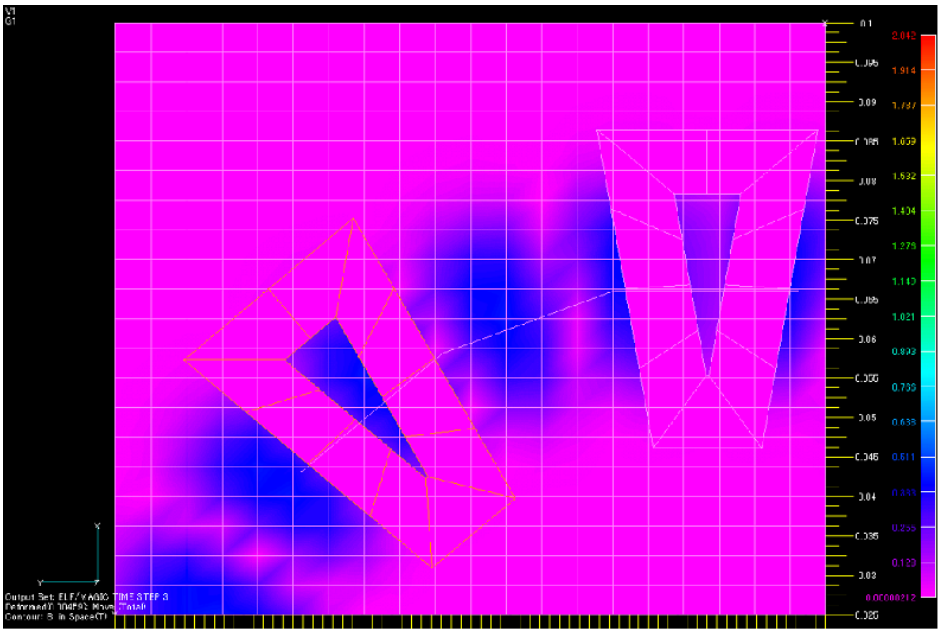

図 43　コアレス発電機　空間磁場　X-Y 方向

最大磁束密度（赤）2.042　T

最小磁束密度（ピンク）2.12×E-6　T

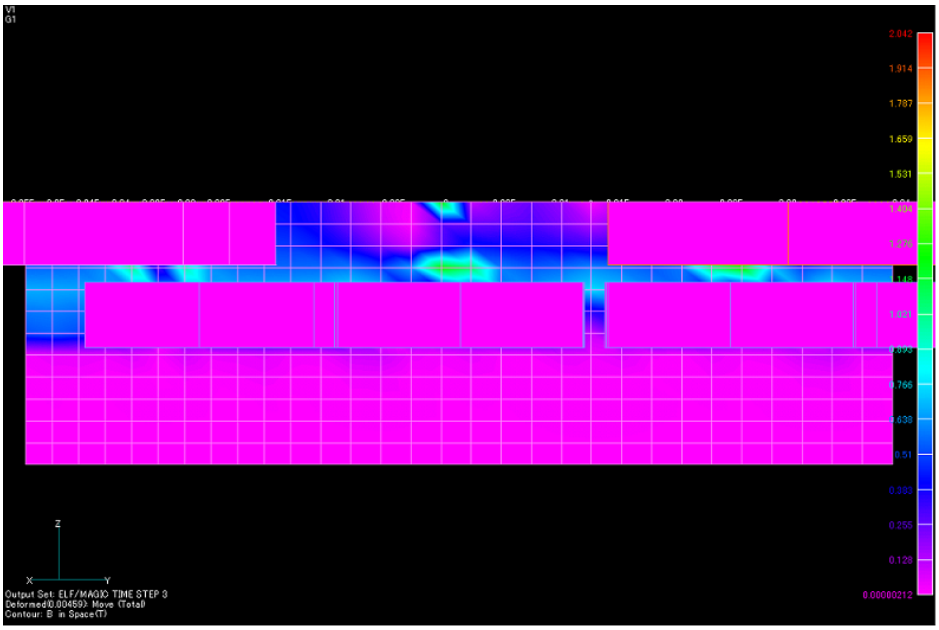

図 44　コア有り発電機　空間磁場　X-Z 方向

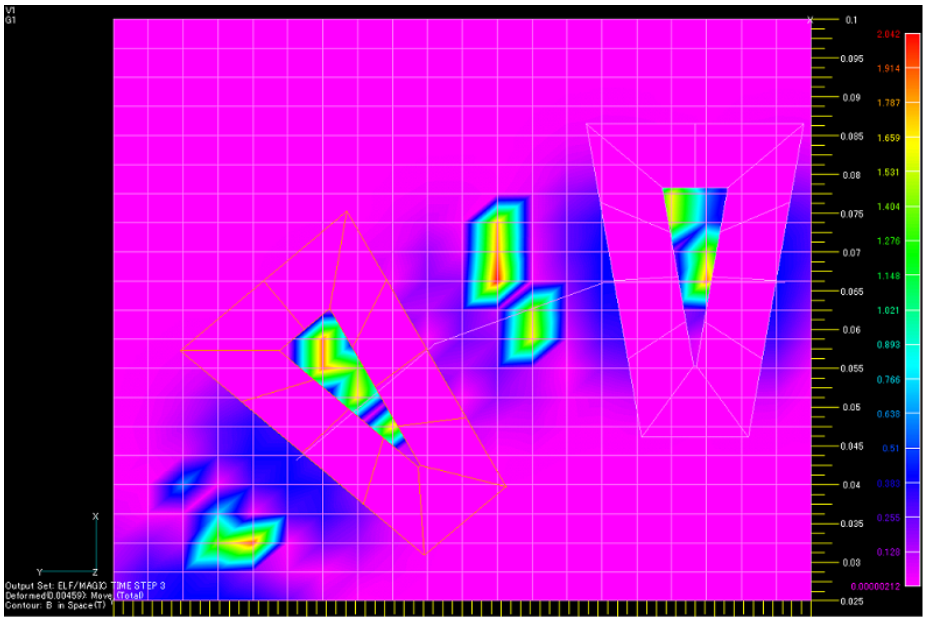

図 45　コア有り発電機　空間磁場　X-Y 方向

最大磁束密度（赤）2.042　T

最小磁束密度（ピンク）2.12×E-6　T

図 42、図 43、図 44、図 45 に、ある回転角度（3°）での空間磁場の様子を示す。図 42、図 43 がコアレス、図 44、図 45 がコア有り(4.8㎜)である。コア有りでは、コアレスに比べて隣り合う磁極同士の磁束漏れが減り、コイル内部を通過する磁束が増加している様子が見られる。

5-4. 考察

コアレス発電機におけるコアを配置した場合の電圧とトルクの関係、発電機内部の空間磁場を示した。

コアを配置した場合の電圧とトルクの関係においては、配置するコアの厚みを厚くしていった場合、次のような関係が得られた。無負荷電圧では厚みを増すごとに直線的に値が大きくなる直線的なグラフが得られた。トルクは厚みを増すごとに２次曲線的なグラフの値を取った。この関係を利用すればコアの形状（この場合特にコアの厚みを調節することで）によってはトルクの値を抑えた状態で電力を増加させることが出来る。今後は風車の羽から得られるトルクとの関係も考慮し、コア形状の検討を進めたい。

空間磁場解析を用いて、それぞれのコアの形状によっての発電機内部の磁束密度を可視化した。これにより問題点の明確化や解決の確認、正常に磁気回路が整形されているかの確認が可能となった。今後さらに、この空間磁場解析を利用し高性能化に向けた検討を行う。

第６章．同径の発電機におけるコイル数、磁極数変化の影響

6-1．概要

これまでの研究で、コアレスの小型発電機において高効率発電につながる設計指針が得られている。それを以下に示す。

１）周速度の関係から出来るだけ大径化する

２）磁石数、コイル数はスペース内で出来るだけ多くする

３）磁石：コイル数の比は４：３とする。

４）コイルは集中巻きと分布巻きがあるが今回は製作が容易である集中巻きとする

５）磁石は高磁束密度の希土類磁石を使用する。

発電機の設置範囲が制限されるなど、発電機の利用目的によっては発電機の直径を変えることなく性能を向上させる設計因子が求められる。そのため今回は、２）と３）の指針に着目し検討した。そこで発電機の直径がほぼ同じで、磁石とコイル数の違うモデルを 2 つ作成した。この 2 つの発電機について動磁場解析を用いて発電性能の比較を行う。

6-2．モデル条件

コイル数と磁極数の変化による影響を調査するためこれら以外の条件は両モデルが同じになるようにした。発電機の直径だけでなく、配置する磁石間の距離やコイル間の距離にも注意しモデル作成を行った。比較のために作成したモデルの条件と解析条件を表９に示す。

モデル名	コイル数	磁極数	磁石間距離(z方向)	ロータ直径	コイル巻数
SK2128	21個	28極	17.6mm	227mm	81ターン
32	24個	32極	17.6mm	225mm	81ターン
SK2736	27個	36極	17.6mm	225mm	81ターン
SK3040	30個	40極	17.6mm	224mm	81ターン

Pro-Engineer で作成した発電機モデル（1/2）を以下に示す。（図 46，47）

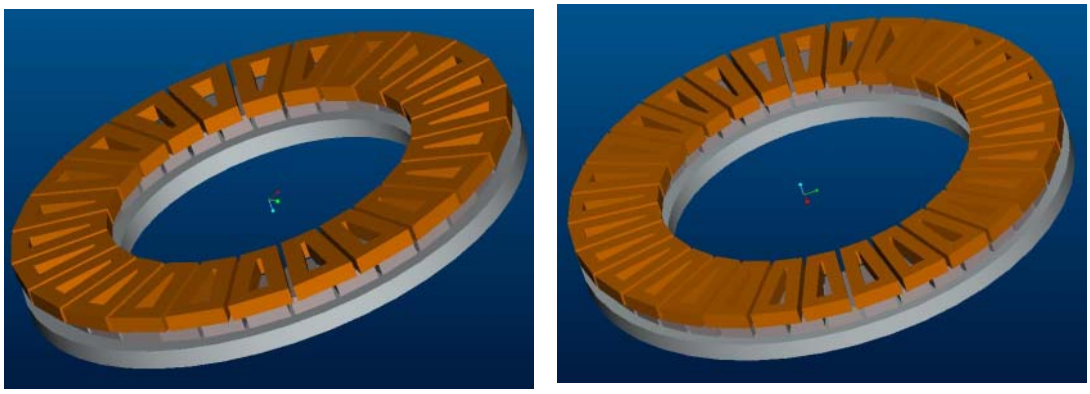

図 47　SK3040 モデル図

6-3. 解析結果

解析結果を以下に示す。一例として、図 48 に SK2128 の回転角度による無負荷電圧の変化を示す。

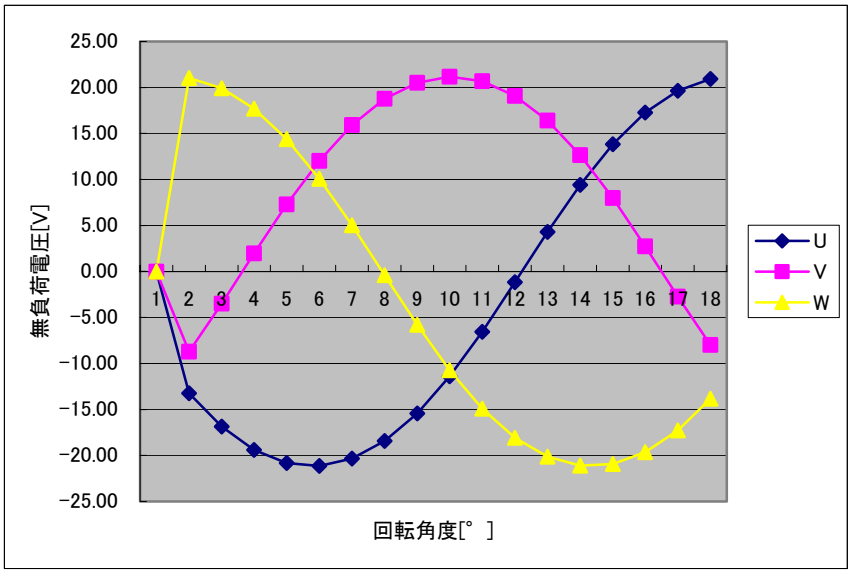

図 48　SK2128 の回転角度による無負荷電圧の変化

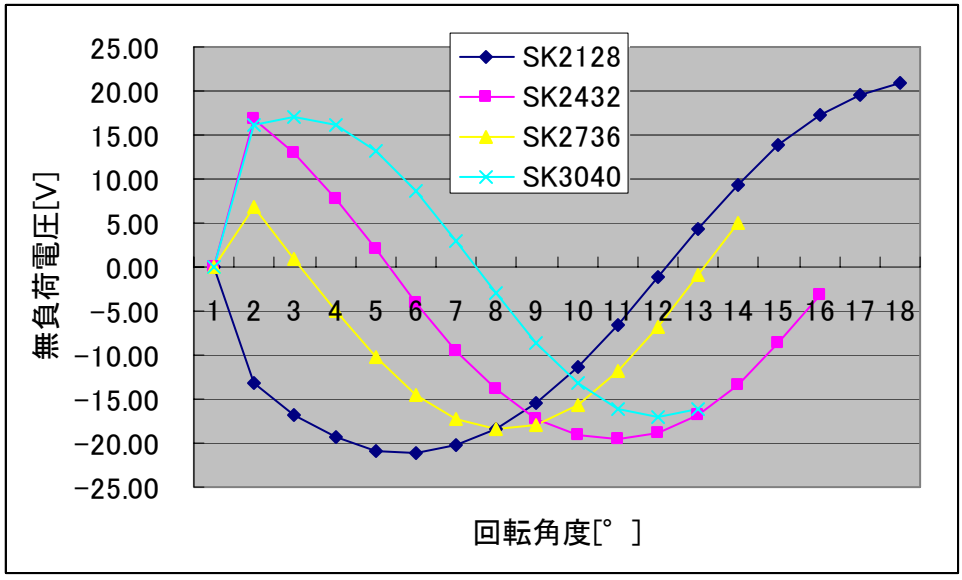

図 49　各発電機 U 相の比較

さらに、各コイルで得られた最大電圧値の比較を以下に示す。

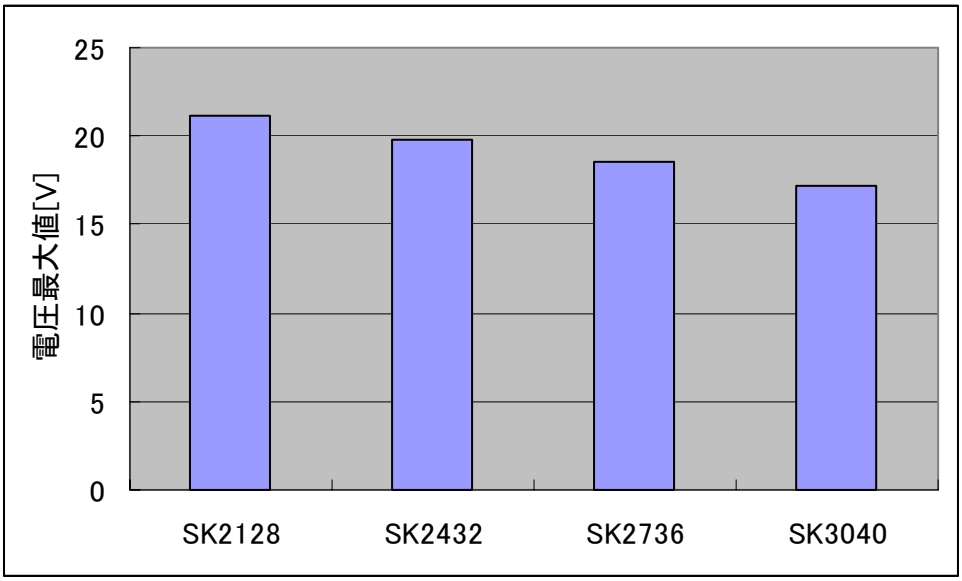

図 50　無負荷電圧最大値の比較

図 49、図 50 において、解析で求めた開放電圧値はコイル 1 個あたりの誘起電圧である。電流は三相交流で取り出すので、コイルを 2 個飛ばしで直列に繋ぐと考える。よってこの値とコイル数/3 を掛けた値を比較する。

SK2128 の誘起電圧（1 相あたり）

誘起電圧最大値×コイル数/3＝21.16V×7＝148.12V

SK2432 の誘起電圧（1 相あたり）

誘起電圧最大値×コイル数/3＝19.77V×8＝158.16V

SK2736 の誘起電圧（1 相あたり）

誘起電圧最大値×コイル数/3＝18.50V×9＝166.5V

SK3040 の誘起電圧（1 相あたり）

誘起電圧最大値×コイル数/3＝17.15V×10＝171.5V

比較ではコイル数を増やすと無負荷電圧増加している。しかしコイル数を増やすとコイル断面積が小さくなるため、実際のコイルの巻き数が解析条件よりも少なくなることが予想される。そのため磁場解析による同径の発電機におけるコイル、磁石数変化による比較では、磁石とコイルの数を増やしても電圧増加に繋がらないという結論に至った。

発電機の回転に必要なトルクはどのモデルにおいても、ほぼ 0 Nm となったため今回は省略する。

6-4. 磁場解析値の妥当性の検討

解析値の妥当性の検討のため、手計算による解析値との比較を行う。今回の解析では発電機全体の直径を変えることなく磁石とコイル数を変化させた。この際、発電機の無負荷誘起電圧に影響する要因は次の４つがあると推察される。

１）　磁極面積の変化（磁束密度の変化）

２）　等価的な速度の変化

３）　磁束を横切るコイル長さの変化

４）　コイル角度と磁極角度の機械角の変化

１）　同じ発電機直径で磁極数を増やしたため、XY 方向の磁石面積が変化する。それによって磁束も変化する。磁束は面積に比例するため、面積比を求める。CAD で描いた図面から面積を求めた。

A（SK3040）/A（SK2432）＝359/470＝0.76

A（SK2736）/A（SK2128）＝403/545＝0.74

A（SK2736）/A（SK2432）＝403/470＝0.86

A（SK2432）/A（SK2128）＝470/545＝0.86

２）　磁極数を増やしたためコイル１つが磁石の N 極から S 極まで切り替わる速度が変化する。発電機が１回転する際の誘起電圧の周波数から等価的な速度比を求める。

速度比 V＝発電機 A の N 極と S 極の切り替わり数/発電機 B の N 極と S 極の切り替わり数、切り替わり数=磁極数/2

V=切り替わり数（SK3040）/切り替わり数（SK2432）＝20/16＝1.25

V=切り替わり数（SK2736）/切り替わり数（SK2128）＝18/14＝1.28

V=切り替わり数（SK2736）/切り替わり数（SK2432）＝18/16＝1.13

V=切り替わり数（SK2432）/切り替わり数（SK2128）＝16/14＝1.14

３）　起電力は次式のように磁束を横切るコイル長さに比例する。コイル長さの比を求める。

$$e = vBl$$

v：速度［m/s］

B：磁束密度[T]

L:磁界中の電線の長さ［m］

CAD で描いた図面からコイル長さを求めた。

L（SK3040）/L（SK2432）＝40.46/43.455 = 0.93

L（SK2736）/L（SK2128）＝41.45/45.43 = 0.91
L（SK2736）/L（SK2432）＝41.45/43.455 = 0.95
L（SK2432）/L（SK2128）＝43.455/45.43 = 0.96

４）　同じ発電機直径で磁極数、コイル数を増やしたため、コイル角度と磁極角度の機械角が変化する。SK2432 と SK3040 のコイル角度と磁極角度の角度差（機械角）を電気角に変換して比較する。

SK2128 の機械角：　コイル角度－磁極角度＝17.14－12.86＝4.28
SK2432 の機械角：　コイル角度－磁極角度＝15－11.25 = 3.75
SK2736 の機械角：　コイル角度－磁極角度＝13.33－10＝3.33
SK3040 の機械角：　コイル角度－磁極角度＝12－9 = 3

SK2128 の電気角：　360 / N→S の切り替わり数＝360/14＝25.71
SK2432 の電気角：　360 / N→S の切り替わり数＝360 / 16= 22.5
SK2736 の電気角：　360 / N→S の切り替わり数＝360/18＝20
SK3040 の電気角：　360 / N→S の切り替わり数＝360 / 20 = 18

SK2128 の機械角を電気角に変換：　4.28/25.71×360＝60
SK2432 の機械角を電気角に変換：　3.75 / 22.5×360 = 60
SK2736 の機械角を電気角に変換：　3.33/20×360＝60
SK3040 の機械角を電気角に変換：　3.0 / 18 ×360 = 60
よって機械角の比は 1 となる。

１）～４）のすべての比の積は
SK3040 と SK2432 の比：イ）0.76×1.25×0.93×1 = 0.88
SK2736 と SK2128 の比：ロ）0.74×1.28×0.91×1＝0.86
SK2736 と SK2432 の比：ハ）0.86×1.13×0.95×1 = 0.92
SK2432 と SK2128 の比：ニ）0.86×1.14×0.96×1＝0.94
これがそれぞれのコイル 1 相における比である。

イ）の場合、解析で求められたそれぞれのコイル 1 相における無負荷誘起電圧の値は
SK2432：19.77V
である。この値に先程手計算で導いた比を掛ける。
19.77×0.88＝17.39V
で、解析で導いた
SK3040：17.15V にほぼ一致する。

さらに、ロ）の場合も同様に無負荷電圧は
SK2128：21.16V
である。この値に先程手計算で導いた比を掛ける。
21.16×0.86＝18.19V
で、解析で導いた
SK2736：18.50V にほぼ一致する。

次に、ハ）の場合も同様に無負荷電圧は
SK2432：19.77V
である。この値に先程手計算で導いた比を掛ける。
19.77×0.92＝18.19V
で、解析で導いた
SK2736：18.50V にほぼ一致する。

さらに、ニ）の場合も同様に無負荷電圧は
SK2128：21.16V
である。この値に先程手計算で導いた比を掛ける。
21.16×0.94＝19.89V
で、解析で導いた
SK2432：19.77V にほぼ一致する。

以上のことから、解析で求められた値は妥当であるといえる。

第 7 章　コアの材質による影響

7-1. 概要

これまでの研究でコア形状については最適な形状を求めることが出来た。それは薄板上のコアをコイル中心に配置することで、コアレスに比べて発電量を 1.3 倍にすることができる。

今回はさらにコアの材質においてどのような特徴を持つものが適するか検討をおこなう。コアの材質によって発電性能にどれ程の影響を与えるかを調べるため、コアの材質を特徴ある 2 つの値に仮定して動磁場解析を行う。今回は素材 A,B の磁化曲線を極端な値で仮定する。これによってどのような磁化特性を持つ材質がこの発電機のコアに適しているかを検討する。

7-2. 解析の条件

以下に解析モデルと素材 A,B の磁化曲線を示す。図 51 のモデルはコア形状の検討を行ってきた２００mm の発電機である。薄板状のコアの厚みは 0.5mm である。図 52 において素材 A は透磁率 0.213[H/m]、素材 B は透磁率 0.4×10^{-4}[H/m]としている。

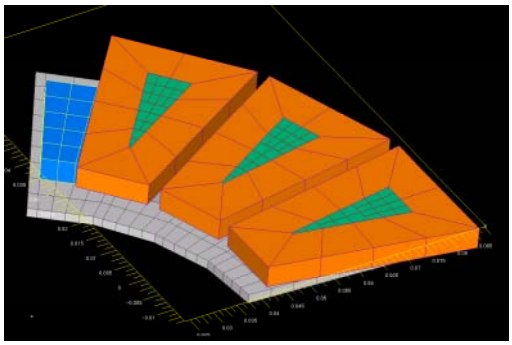

図 51　解析モデル

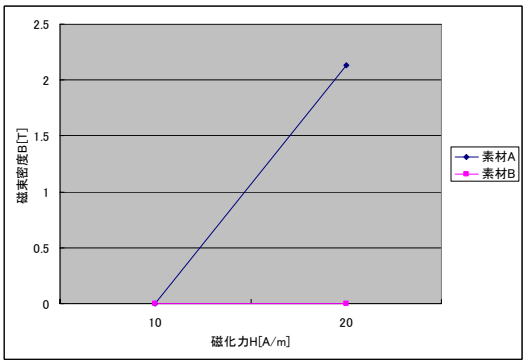

図 52　素材 A、B の磁化曲線

7-3. 解析結果と考察

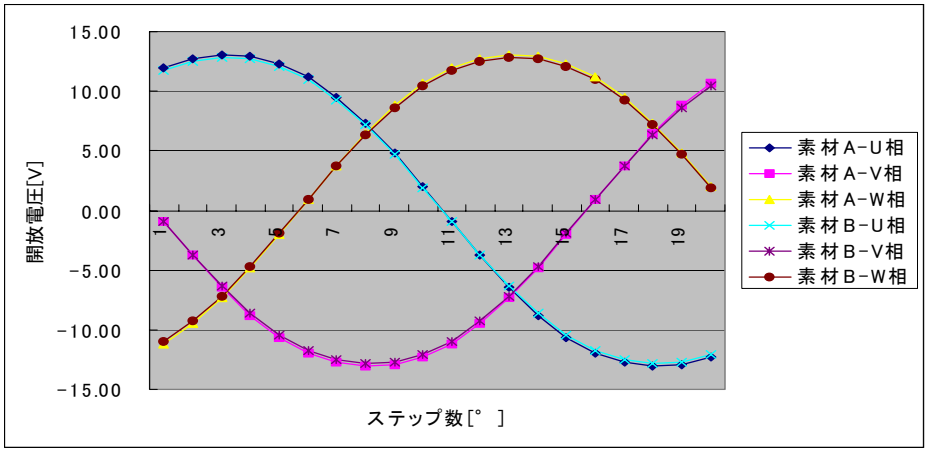

図 53　無負荷電圧の比較

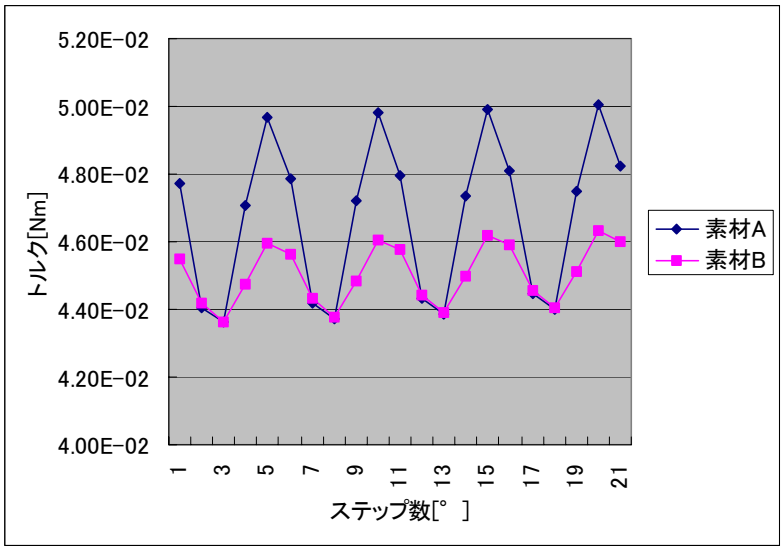

図 54　トルクの比較

図 53 は素材 A,B の線間における無負荷電圧である。図 54 は素材 A,B の電気的な回転トルクを現している。開放電圧は素材 A,B ともほぼ同じ値となった。トルクにおいても同様にほぼ同じ値を取っている。

コアの特性による影響に差が生じなかったのは以下のように推測される。磁極とコアの間には 2 ㎜のエアギャップが存在する。そのため空気中の透磁率の低さによってコアに到達する以前に磁束が失われ、コアに到達する磁束が小さくなり、磁化特性による影響が出ないと考えられる。

第 8 章　４５０mm 発電機の軽量化の検討

8-1. 概要

現在、株式会社スカイ電子では風力発電用４５０mm の開発を行っている。この発電機の性能向上に向けて軽量化の検討を行った。発電機の自重が軽量化されることで機械的な損失を抑え、性能向上を図る。具体的には、磁場解析を用いて発電機のバックヨークの厚みを薄くしていった際の発電性能の変化を観察した。バックヨークの材質は鉄であり、この厚みが 1 mm 薄くすることでも大幅な軽量化に繋がる。

8-2. 発電機の条件、解析条件

現在、実際に製作された 450mm 発電機の仕様を表 10 に示す。バックヨークの厚みを 6 mm から 1 mm ずつ薄くしていき、発電性能の変化を観察した。バックヨークは、発電機内の磁気回路を形成するために必要な部材である。解析モデルにおいての各部材の厚みは図 56 に示す。

図 55 に発電機の解析モデルを示す。計算時間の省略と解析精度を考慮し、24 分の 1 モデルで計算を行う。回転数は 200rpm とした。

外形寸法	直径450mm
構造	アキシャル・アウターロータ型、コアレス発電機
磁極数	48 極
コイル数	36 個(12 個/相)
磁極厚み	8mm
コイル厚み	12mm
バックヨーク厚み	6mm
コイルターン数	53T

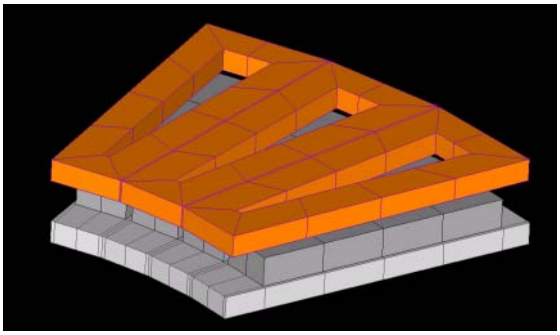

図 55　解析モデル

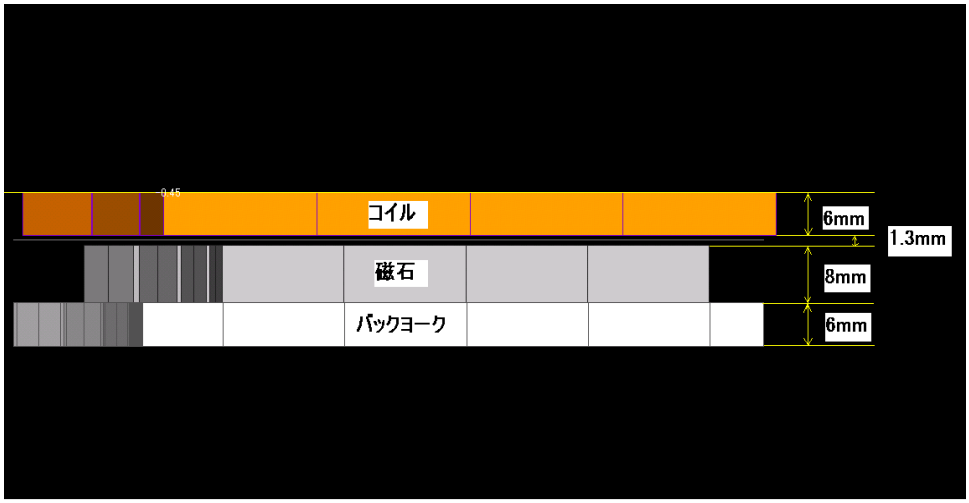

図 56　格部材の厚み

8-3. 解析結果と考察

解析では無負荷電圧は U,V,W の 3 相で出力される。比較を容易にするため V 相の値で比較を行った。各ステップ数の無負荷電圧の変化を図 57 に示す。X 軸がステップ数で 1 ステップ 1 度である。Y 軸が無負荷電圧である。

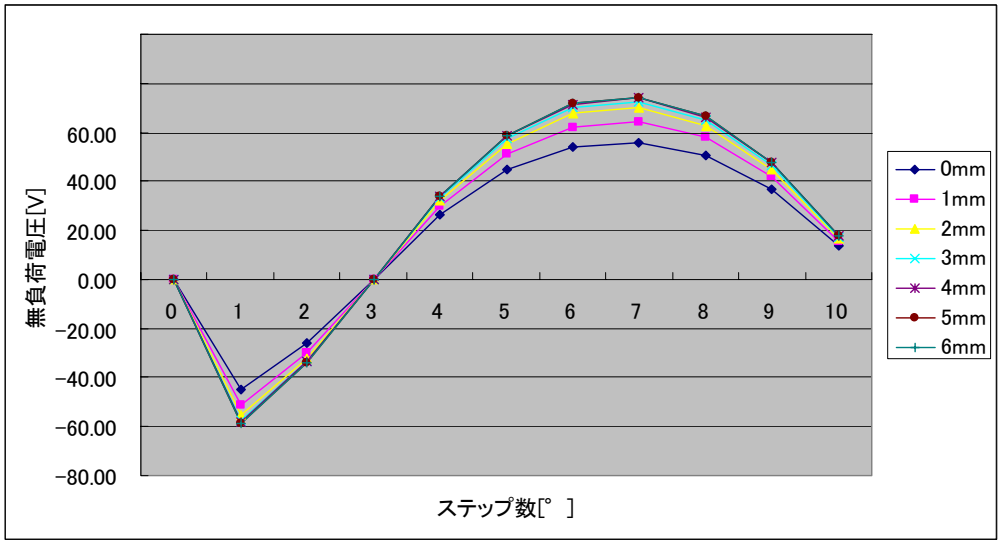

図 57　無負荷電圧の変化（V 相）

各ステップ数のトルクの変化を図 58 に示す。

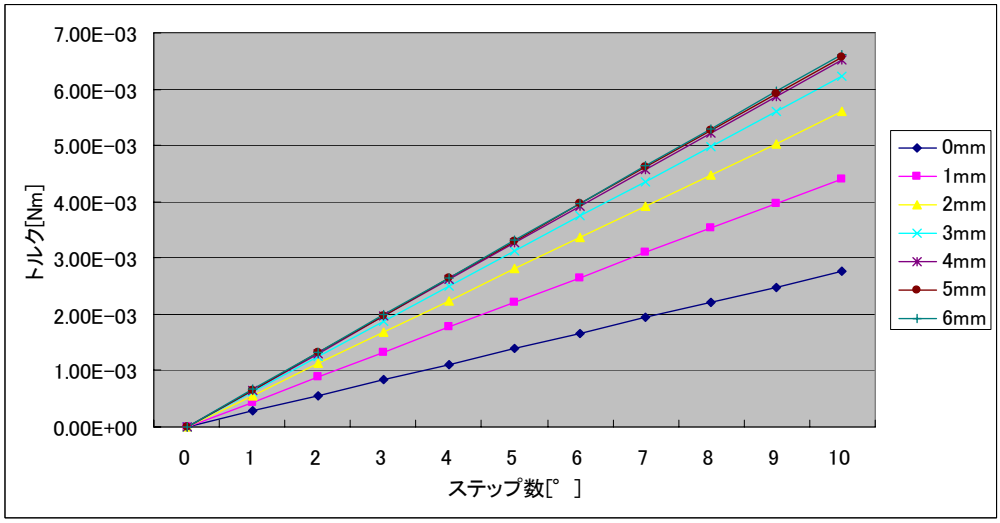

図 58　各ステップ数のトルクの変化

バックヨークの各厚みによる変化をより分かり易く比較するため、無負荷電圧の最大値とトルク平均値を求めた。以下に比較の表とグラフを示す。

11

バックヨーク厚み	0mm	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm
無負荷電圧最大値[V]	55.89	64.45	69.90	72.63	73.91	74.21	74.36
トルク平均値[Nm]	3.12E+01	3.58E+01	3.87E+01	4.02E+01	4.09E+01	4.10E+01	4.11E+01

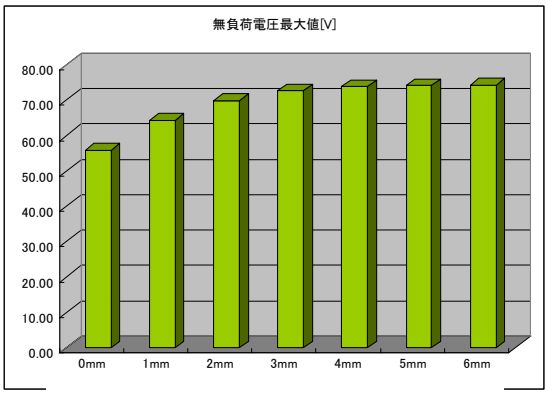

図 59　無負荷電圧最大値の比較

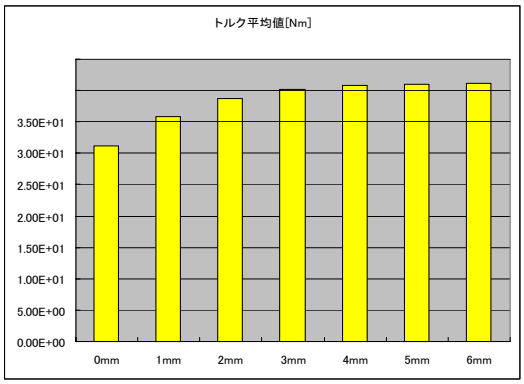

図 60　トルク平均値の比較

トルクの値に関しては値が非常に小さいので無視して考える。そして、電圧値を考慮しヨークの厚みを検討する。表 11、図 59、図 60 を参考にすると、バックヨークの厚み 3 mm 以降それ以上厚くしても 4mm が 1.3V の増加、5mm が 0.3V の増加とほとんど変化がないのが分かる。よって 3mm が最適であると考えられる。

第 9 章　結言

9-1. まとめ

本研究の目的に沿う、低トルクから回転する小型風力発電機の新たな設計指針を導くため、次の検討を行った。まず解析値と実験値の比較を行い、2 つの近似した結果を得た。これにより、本解析ソフト ELF/MAGIC を利用して発電機の性能向上に関する検討を行えることが確認できた。その後、本研究では動磁場解析を用いて以下の検討を行った。

A.　コア形状が発電性能に及ぼす影響
B.　バックヨークの厚さによる発電能力への影響
C.　コア厚みを変化した場合の電圧とトルクの関係、発電機内部の空間磁場の観察
D.　同径の発電機におけるコイル、磁石数変化による影響
E.　コアの材質についての検討
F.　４５０mm 発電機の軽量化の検討

Aでは既存のアキシャルギャップコアレス発電機に関して、コイルを通過する磁束を増やすためコイルにコアを配置することを考えた。コアを配置することでコギングトルクが生まれるが、コアの形状次第ではコギングトルクを少なくする事ができ、発電能力の向上が行えるのではないかと考えた。５種類のコア形状について無負荷電圧と回転に必要なトルクについて動磁場解析を用いて計算をおこなった。結論として薄板上のコアにパンチ穴を開けたコア形状を採用することでトルク値を抑えつつ、発電性能を向上させる事が出来た。コアレス発電機に比べ無負荷電圧最大値で 13.5%増加している。このほかにもコアの形状によってはトルク値を抑えつつ発電性能の向上が可能であることが分かった。

B においては現在開発中である 450mm 発電機の軽量化のため、バックヨークの厚みによる発電性能の変化を調査した。解析の値を参考に検討したところ、バックヨークの厚みは 3mm が最適であると考えられる。

Cについて、コイル内に配置するコアの厚みを変化させた場合、コアの厚みと電圧とトルクにおいて以下の関係が得られた。無負荷電圧では厚みを増すごとに直線的に値が大きくなる直線的なグラフが得られた。トルクは厚みを増すごとに２次曲線的なグラフの値を取った。この関係を利用すればコアの形状（この場合特にコアの厚みを調節することで）によってはトルクの値を抑えた状態で電力を増加させることが出来る。例えば厚さ 2mm であれば回転に必要なトルクを増やすことなく 25%の発電性能の向上を見込める。さらに、空間磁場解析を用いて、それぞれのコアの形状によっての発電機内部の磁束密度を可視化した。

Dに関しては以下の結論に至った。同じ直径の発電機において、ある数以上コイルと磁極数を増やす場合、発電機全体で見たときの発電量は必ずしも増加しない。これはコイルと磁極数を増やしたためにコイルの面積、ターン数が減少し、磁極一つ一つの面積が狭ま

ったためと考えられる。

E においては以下の結論に至った。現在検討しているコア入り発電機について、コアの材質の透磁率による発電量の差異はほとんど見られなかった。磁極とコアとのエアギャップが原因となりコアに到達する磁束が失われ、コアに到達する磁束が小さいため、磁化特性による影響が出なかったと考えられる。

F では、風力発電用４５０mm の性能向上に向けてバックヨークの軽量化の検討を行った。バックヨークの厚みを３mm 以降それ以上厚くしても 4mm が 1.3V の増加、5mm が 0.3V の増加とほとんど変化が見られなかった。よって今回の場合は 3mm が最適であると考えられる。

9-2. 結論

以上の研究を基に本研究の発電機の新たな開発指針を考察した。従来のコアレス発電機は次の設計因子を考慮すればさらに発電効率を向上することが出来る。その設計因子は以下の 3 つである。

１）直径 250mm 発電機においてコイル数、磁極数がコイル 21 個、磁極 28 極以上であれば、その数で性能に優劣は無い。したがって製作に容易な磁石、コイル数の配置を設計すべきである

２）トルクで回転する風力用発電機についてコアを配置することは性能上、有効である。厚さ 2mm で、コイル内一面にコアを配置する薄板形状であれば回転に必要なトルクを増やすことなく 25%の発電性能の向上を見込める

３）バックヨークの厚みに関しては、厚み 3ｍｍ以上から電圧は微増に止まる。3mm を超えるとバックヨークの厚みで得られる発電性能の向上は飽和状態となる。したがって３mm 以上の厚さで重量とのバランスを考慮し設計を決定する。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導を頂きました高知工科大学工学研究科基盤工学専攻知能機械システム工学コースの坂本東男教授に深く感謝致します。本論文を査読していただきました、徳田仁教授、百田佐多男教授に厚く御礼申し上げます。

また、風力発電機での共同研究をさせて下さいました、(株)スカイ電子の廣林孝一社長、(有)坂本技研の坂本正興社長、各種計測データをご提供頂きました高知工業高等専門学校の野村弘教授、研究を行うにあたり度々ご相談をさせて頂きました高知工業専門学校の藤原憲一郎教授、動磁場解析で度々、ご相談をさせて頂きました(株)エルフの朝井敏文様、研究室発電機チームの尾崎聖宏氏、に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1）ELF/MAGIC　取扱説明書

2）内野喬誌　“動磁場解析を用いた低回転用小型風力発電機の開発と最適設計”

3）汀祥子　“小型風力発電機の設計因子と磁場解析”

4）見城尚志　佐渡友茂　“小型モータのすべて”

5）長岡洋介　“電磁気学Ⅰ”